



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio del comportamiento a fuego de pilares de acero inoxidable en edificios residenciales e industriales

Trabajo realizado por:

Kevin Isaac Escobar

Dirigido por:

Mirambell Arrizabalaga, Enrique

Máster en:

Ingeniería estructural y de la construcción

Barcelona, Junio 2019

Departamento de ingeniería civil y ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Resumen

Muchas son las bondades que poco a poco se van descubriendo del acero inoxidable y sus múltiples aleaciones, cada una de ellas con sus propiedades intrínsecas según su estructura molecular. Si bien es cierto que el acero inoxidable es una aleación con base el hierro al igual que el acero al carbono, la composición interna varía y sus propiedades presentan comportamientos muy diferentes a los del acero al carbono, como por ejemplo un límite elástico no tan bien definido. Los códigos de diseño de acero inoxidable estructural existentes se apoyan en gran parte en supuestas analogías con el comportamiento del acero al carbono como las mostradas en la EN 1993-1-4, y aunque esto pueda ser provechoso en términos de facilidad de diseño en la transición del acero al carbono al acero inoxidable, es perjudicial cuando se busca un uso eficiente de las propiedades específicas del acero inoxidable. La divergencia es más notable si se estudia en situación de incendio. Puesto que no existe una normativa para el acero inoxidable, se tiene que recurrir enteramente a las formulaciones del acero al carbono especificadas en la EN 1993-1-2, aunque actualmente hay una propuesta en el Anejo C de EN 1993-1-2 en revisión, que tiene formulaciones específicas para el acero inoxidable, que serán utilizadas para este análisis. Dicha propuesta plantea un modelo de material más apropiado y formulaciones más completas para la verificación en situación de incendio.

Mediante un modelo numérico, se estudia la respuesta de pilares biapoyados sometidos a esfuerzo axial de compresión y a cargas térmicas derivadas de la situación de incendio; utilizando acero inoxidable y acero al carbono. Las características de la sección transversal y longitud son acordes a las típicas de edificios residenciales e industriales. Se han considerado algunas longitudes más para poder reproducir de mejor manera las curvas de pandeo y tener más datos de comparación. Se utiliza un perfil de sección abierta HEB160 con longitudes desde un metro hasta ocho metros de altura. En cuanto al fuego es importante la ubicación del elemento estructural dentro del recinto y se asume un pilar interior sometido a un incendio sobre todas sus caras. El estudio se divide en dos tipos de análisis: uno basado en el método tradicional mecánico en el que, basándose solo en la reducción de las propiedades mecánicas del material a una temperatura elevada, se determina el esfuerzo último al que éste puede ser sometido; el segundo análisis estudia el comportamiento a través del tiempo del pilar cuando éste se encuentra en un incendio reproducido por la curva nominal de fuego ISO 834 (EN 1991-1-2) y bajo diferentes coeficientes de utilización, considerándose las propiedades térmicas del material según la forma de transferencia de calor y la evolución de la temperatura en el pilar.

Para comprender mejor el estudio, los primeros capítulos están dedicados a explicar brevemente los aspectos y fenómenos más relevantes mecánicos y térmicos que intervienen en el tipo de análisis descrito anteriormente. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de ambos enfoques en los que, del análisis mecánico se concluye que, la resistencia del pilar a elevadas temperaturas aumenta en un 43.30% si se utiliza acero inoxidable en lugar de acero al carbono, mientras que del análisis termo-mecánico acoplado, el tiempo resistente del pilar aumenta en un 66.32% al emplear acero inoxidable en lugar de acero al carbono.

Abstract

Many are the benefits of stainless steel and its many alloys that are gradually being discovered, each one of them with inherent properties according to the molecular structure. Stainless steel is an iron-based alloy, as well as carbon steel, but the internal molecular composition and material properties are very different from carbon steel, such as a yield stress not so well defined. Structural design codes of stainless steel are mostly based on analogies from the behavior of carbon steel, as EN 1993-1-4. Although this could be advantageous in design terms in the transition from carbon steel to stainless steel, it is detrimental when you look for an efficient use of the stainless steel properties. This fact is more noticeable in the fire situation design, where the rules for carbon steel specified in EN 1993-1-2 are directly applied for stainless steel, due to the lack of a specific code. Nowadays, there is a proposal in the Annex C, EN 1993-1-2 (in revision version) that is offering design rules for stainless steel in fire situation, to be adopted for thermal and structural analysis. This proposal has a more appropriate material model for stainless steel, based on Ramberg Osgood model, and more completed formulations for verification in fire situation.

In this work, a simply supported column subjected to an axial compression force and thermal loads derived from fire situation is analyzed. The column characteristics of cross section and length have been adopted from the typical dimensions in residential and industrial buildings. Different lengths were considered in order to reproduce a wider range of the non-dimensional slenderness in the buckling curves. The chosen cross section is an open section HEB160 with lengths from one meter to eight meters height, considered as an interior column placed in a room and subjected in all faces to fire. The study is divided in two analysis: one based on the traditional resistance domain, in which considering only the reduction of the mechanical material properties at elevated temperature, the maximum axial load is determined; the second analysis, is based on the study of the structural behavior of the column through the time; the column is subjected to an axial force corresponding to a certain degree of utilization and then fire starts, considering the nominal fire curve ISO 834 (EN 1991-1-2). Therefore, thermal material properties should be considered according to the heat transfer mechanisms and the evolution of the temperature.

For a better understanding of this study, the first chapters are destined to briefly explain the more relevant mechanical and thermal aspects and the phenomena that take place in the analyses previously described. Finally, the obtained results of both analyses are presented, showing an increase in the resistance of the column of 43.30% by using stainless steel instead of carbon steel in the resistance domain, and from the coupled temperature-displacement analysis in the time domain, an increment in the time resistance to fire of 66.32% by adopting stainless steel.

Agradecimientos

La elaboración de este documento no hubiera sido posible sin la ayuda de Dios que me permitió a pesar de muchas dificultades, poder realizar un estudio de posgrado y cumplir una meta más en mi vida, puso personas y situaciones claves que hicieron posible este proyecto.

Agradezco también a mi tutor el ingeniero Enrique Mirambell que además de aceptarme para trabajar en conjunto, me guio en este proceso y siempre estuvo dispuesto a dedicarme tiempo para resolver las dudas que surgían sin importar el momento en que llegara a preguntar. Tanto su conocimiento como su personalidad fueron cruciales para generar un ambiente de confianza que me permitiera desarrollarme más.

Finalmente doy gracias a mi familia que desde mucho tiempo atrás me han motivado a seguir creciendo profesionalmente y continuar con mis estudios. Aun estando lejos sus palabras han servido para fortalecerme y hacerme creer capaz de lograr este objetivo, en especial mi abuela María Elena Escobar y mi papa Jorge Alberto Delarca. Mis compañeros de master han sido otro apoyo importante, a través del tiempo fuimos fortaleciendo una amistad y creando una familia en un lugar lejos de mi país, compartimos experiencias, alegrías, frustraciones, celebraciones y otras vivencias que me han hecho sentir en casa, me aportaron confianza y creyeron conmigo en este proyecto. También expreso mi gratitud a Guillermo Segura que estuvo presente en todas las dudas que se presentaron en mi proyecto aun cuando él estaba trabajando en el suyo y con muchas cosas por hacer.

Contenido	
Resumen	1
Abstract	2
Agradecimientos	3
Contenido	4
Lista de figuras	7
Lista de tablas	9
Simbología	10
Esquema de la tesis	12
 CAPÍTULO I. Introducción	 13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Bases de diseño	15
1.3.1 Estados límite últimos	15
1.3.2 Tipos de secciones transversales	16
 CAPÍTULO II. Estado del conocimiento: comportamiento mecánico y térmico de los elementos estructurales	 18
2.1 Elasticidad lineal	19
2.2 Carga de bifurcación del equilibrio	19
2.3 No linealidad geométrica	20
2.4 Pandeo por flexión	20
2.4.1 Longitudes de pandeo	21
2.4.2 Tensión crítica de Euler	21
2.4.3 Imperfecciones iniciales	22
2.4.4 Curvas europeas de pandeo	23
2.4.5 Consideración de las imperfecciones	24
2.5 No linealidad del material	24
2.6 Temperatura y calor	24
2.6.1 Esfuerzo térmico	24
2.6.2 Calor específico	25
2.6.3 Mecanismos de transferencia de calor	25
2.6.4 Efecto de sombra y radiación en cavidad	27
2.7 Modelización de incendio	28
 CAPÍTULO III. Comportamiento constitutivo del acero al carbono y acero inoxidable en situación de incendio	 31
3.1 Acero al carbono	31
3.1.1 Propiedades del acero al carbono	31

3.1.2	Comportamiento tensión- deformación EN 1993-1-2	31
3.1.3	Comprobación de estados límite últimos en situación de incendio.....	35
3.2	Acero inoxidable	36
3.2.1	Tipos de acero inoxidable	36
3.2.2	Propiedades de los aceros inoxidables	38
3.2.3	Comportamiento tensión-deformación	38
3.2.4	Verificación según normativa EN 1993-1-2 (2005).....	39
3.2.5	Verificación según propuesta del Anejo C EN 1993-1-2 (En revisión)	46
CAPÍTULO IV. Modelo numérico		54
4.1	Descripción del método	54
4.2	Geometría.....	54
4.3	Mallado	55
4.3.1	Optimización de malla y validación del modelo	56
4.4	Propiedades del material	59
4.4.1	Relación constitutiva	59
4.4.2	Deformación verdadera	60
4.4.3	Tensión verdadera	61
4.5	Cargas	62
4.5.1	Esfuerzo axial	62
4.5.2	Carga térmica	62
4.6	Análisis de autovalores	63
4.7	Tensiones residuales e imperfecciones geométricas	64
4.8	Análisis no lineal	65
4.8.1	Método de Newton-Raphson	65
4.8.2	Método Riks.....	67
4.8.3	Análisis temperatura- desplazamiento acoplado	68
CAPÍTULO V. Estudios realizados y análisis de resultados		70
5.1	Verificación en dominio de la resistencia	72
5.1.1	Comparación entre normativa EN 1993-1-2 y propuesta de Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) para acero inoxidable	72
5.1.2	Acero austenítico 1.4301	75
5.1.3	Acero ferrítico 1.4003.....	76
5.1.4	Acero al carbono S275	77
5.1.5	Comparación de resistencia última al fuego del pilar, empleando acero inoxidable y empleando acero al carbono.....	77
5.2	Verificación en el dominio del tiempo	79
5.2.1	Velocidad y aceleración de deformación.....	79
5.2.2	Comparación de tiempo resistente al fuego del pilar, empleando acero inoxidable y empleando acero al carbono.....	81

5.2.3	Comparación de la normativa EN 1993-1-2 con los resultados numéricos.....	83
5.3	Propuesta de mejora de fiabilidad del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)	87
5.3.1	Metodología	87
5.3.2	Nueva propuesta para acero austenítico y ferrítico	88
CAPÍTULO VI. Conclusiones		92
Perspectivas futuras.....		93
Bibliografía y referencias		94
ANEJO A.	Propiedades térmicas.....	96
ANEJO B.	Ecuación de Ramberg-Osgood.....	99
ANEJO C.	Curvas de Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y el modelo numérico.....	100
ANEJO D.	Curvas de pandeo de la nueva propuesta y el modelo numérico	103
ANEJO E.	Análisis en dominio del tiempo y el efecto de sombra	109

Lista de figuras

Figura 1.1 Diagrama momento-rotación de las clases de sección.....	16
Figura 2.1 Grafica del comportamiento de los elementos según el tipo de análisis y consideraciones tomadas.....	18
Figura 2.2 Pilar cargado con un axil “N” y una separación “y”	19
Figura 2.3 Ejemplo de efectos de segundo orden	20
Figura 2.4 Valores de L_{cr} para diferentes condiciones de apoyo	21
Figura 2.5 Parábola de Euler	22
Figura 2.6 Curvas de pandeo experimentales [7].....	23
Figura 2.7 Curvas europeas de pandeo [2]	23
Figura 2.8 Pilar sometido a un incremento de temperatura $\Delta\theta$ con su extremo libre (a) y con sus extremos restringidos (b)	25
Figura 2.9 Transferencia de calor sobre un pilar en situación de incendio	26
Figura 2.10 Efecto de sombra en secciones abiertas	27
Figura 2.11 Efecto de reabsorción de la radiación por cavidad	28
Figura 2.12 Curva nominal tiempo- temperatura (ISO 834).....	29
Figura 3.1 Diagrama tensión - deformación para aceros al carbono con la representación de las magnitudes más relevantes	32
Figura 3.2 Factores de reducción de las propiedades del acero al carbono a diferentes temperaturas	34
Figura 3.3 Diagrama tensión - deformación del acero S275 a diferentes temperaturas	34
Figura 3.4 Diagrama de Schaeffler [12].....	37
Figura 3.5 Diagrama tensión - deformación para aceros inoxidables con la representación de las magnitudes más relevantes	39
Figura 3.6 Diagrama tensión-deformación para Austenítico-I (1.4301) a diferentes temperaturas	45
Figura 3.7 Diagrama tensión-deformación para Ferrítico II (1.4003) a diferentes temperaturas	45
Figura 3.8 Diagrama tensión - deformación para aceros inoxidables con la representación de las magnitudes más relevantes	46
Figura 3.9 Factores de reducción de las propiedades del acero inoxidable Austenítico I a elevadas temperaturas.....	50
Figura 3.10 Factores de reducción de las propiedades del acero inoxidable Ferrítico II a elevadas temperaturas.....	50
Figura 3.11 Diagrama tensión-deformación para Austenítico-I (1.4301) a diferentes temperaturas	51
Figura 3.12 Diagrama tensión-deformación para Ferrítico II (1.4003) a diferentes temperaturas ..	51
Figura 4.1 Tipos de elementos de modelización en FEM.....	55
Figura 4.2 Elemento S4R de 4 nodos con integración reducida	55
Figura 4.3 Relación entre dimensiones de elementos de mallados cuadriláteros.....	56
Figura 4.4 Mallas estudiadas para evaluar la malla óptima	57
Figura 4.5 Diagrama de incremento de carga en función del parámetro de longitud de arco	57
Figura 4.6 Resistencia última en función del número de elementos	58
Figura 4.7 Porcentaje de variación de resultados según el número de elementos	58

Figura 4.8 Resistencia última para el pandeo en el eje débil del análisis de autovalores, según el número de elementos	59
Figura 4.9 Diagrama tensión-deformación con deformaciones totales descompuestas en plásticas y elásticas.....	60
Figura 4.10 Técnica de acoplamiento de nodos (Coupling).....	62
Figura 4.11 Primeros cuatro autovalores de un pilar de cuatro metros a compresión	64
Figura 4.12 Método de Newton-Raphson.....	66
Figura 4.13 Método de Newton-Raphson modificado.....	67
Figura 4.14 Método de longitud de arco (Riks).....	68
Figura 5.1 Modos de fallo en análisis mecánico y análisis temperatura-desplazamiento acoplado, y su distribución de tensiones.....	72
Figura 5.2 Comparación de resultados del acero austenítico 1.4301, entre el modelo numérico y EN 1993-1-2 (en rojo), y entre el modelo numérico y Anejo C EN 1993-1-2 (en gris) a 300°C	73
Figura 5.3 Comparación de resultados del acero ferrítico 1.4003, entre el modelo numérico y EN 1993-1-2 (en azul), y entre el modelo numérico y Anejo C EN 1993-1-2 (en gris) a 300°C	74
Figura 5.4 Curvas de pandeo para acero austenítico 1.4301 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico.....	75
Figura 5.5 Curvas de pandeo para acero ferrítico 1.4003 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico.....	76
Figura 5.6 Curvas de pandeo para acero al carbono S275 obtenidas de EN 1993-1-1 para 20°C, EN 1993-1-2 para elevadas temperaturas, y del modelo numérico en Abaqus	77
Figura 5.7 Resistencia última de pilares entre uno y ocho metros de longitud empleando diferentes materiales y a temperaturas elevadas.....	78
Figura 5.8 Velocidad de deformación del apoyo libre, empleando acero austenítico 1.4301 con un coeficiente de utilización 0.4	80
Figura 5.9 Aceleración de deformación del apoyo libre, empleando acero austenítico 1.4301 con coeficiente de utilización 0.4	80
Figura 5.10 Temperatura crítica de pilar analizado en situación de incendio a diferentes grados de utilización.	81
Figura 5.11 Tiempo de resistencia al fuego del pilar analizado en situación de incendio a diferentes grados de utilización.	82
Figura 5.12 Tiempo resistente al fuego del pilar analizado en situación de incendio, según la temperatura crítica.	82
Figura 5.13 Diagrama Carga(normalizada)-desplazamiento para austenítico 1.4301 a diferentes temperaturas, extraídas de análisis NLGM en modelo numérico	84
Figura 5.14 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero austenítico 1.4301 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico.....	84
Figura 5.15 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero ferrítico 1.4003 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico.....	85
Figura 5.16 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero al carbono según EN 1993-1-2 y según modelo numérico	85
Figura 5.17 Distribución de temperaturas en un elemento sometido a un campo de temperatura homogéneo en todas sus caras	86

Figura 5.18 Aproximación funcional de un conjunto discreto de datos	87
Figura 5.19 Nueva propuesta para el coeficiente de reducción χ por pandeo, para acero inoxidable austenítico (en rojo) ($\alpha_0=1.1$ y $\beta=1.75$)	89
Figura 5.20 Probabilidad acumulada en función de la variable de juicio, de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 para acero austenítico	89
Figura 5.21 Nueva propuesta para el coeficiente de reducción χ por pandeo, para acero inoxidable ferrítico (en azul) ($\alpha_0=0.85$ y $\beta=1.55$)	90
Figura 5.22 Probabilidad acumulada en función de la variable de juicio, de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 para acero ferrítico	91

Lista de tablas

Tabla 1.1 Coeficientes parciales para las acciones [5]	15
Tabla 1.2 Rangos de clasificación de secciones sometidas únicamente a compresión para acero al carbono y acero inoxidable [2], [1].	17
Tabla 3.1 Valores nominales de f_y y f_u a 20°C para aceros estructurales laminados en caliente [2]	33
Tabla 3.2 Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a elevadas temperaturas [4]	33
Tabla 3.3 Propiedades físicas a temperatura ambiente de aceros inoxidables [10]	38
Tabla 3.4 Valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia última f_u para aceros inoxidables estructurales según EN10088 [10]	40
Tabla 3.5 Factores de reducción para la tensión y rigidez de aceros inoxidables a elevadas temperaturas [4]	41
Tabla 3.6 Factores de reducción para el módulo tangente en el límite elástico y la deformación última de aceros inoxidables a elevadas temperaturas [4]	43
Tabla 3.7 Factores de reducción para la tensión y rigidez de aceros inoxidables a elevadas temperaturas [14]	48
Tabla 3.8 Valores de α_0 y β para pandeo por flexión, torsión y flexión - torsión [14]	52
Tabla 5.1 Resumen de los análisis empleados	71
Tabla 5.2 Propiedades geométricas de perfil HEB 160	71
Tabla 5.3 Valores obtenidos de bondad de ajuste y selección de modelos AIC para la norma EN 1993-1-2 vigente y el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)	75
Tabla 5.4 Diferencia porcentual de la resistencia última del pilar, empleando aceros inoxidables respecto al acero al carbono S275	79
Tabla 5.5 Comparación de aceros inoxidables respecto al acero al carbono S275	83
Tabla 5.6 Comparación entre formulación analítica y resultados del modelo numérico	86

Simbología

A	área de la sección transversal
A_s	área superficial de un elemento
A_t	área total de un recinto contando muros, piso y techo incluyendo aberturas
A_v	área total de las aberturas verticales en un recinto
c	calor específico
E	módulo de elasticidad del acero a temperatura ambiente 20°C
$E_{a,\theta}$	pendiente del rango lineal elástico del acero a una temperatura θ
$E_{p0.2,\theta}$	pendiente de la recta tangente al punto donde la tensión es $f_{p0.2,\theta}$
E_d	valor de diseño de las acciones ante una combinación determinada en un estado límite
$f_{p,\theta}$	límite hasta donde aplica la ley de Hooke de proporcionalidad del acero al carbono a una temperatura θ
$f_{y,\theta}$	límite elástico del acero al carbono a una temperatura θ
$f_{p0.2,\theta}$	tensión correspondiente a una deformación remanente del 0.2% a una temperatura θ
$f_{2,\theta}$	tensión para una deformación total del 2% a una temperatura θ
$f_{u,\theta}$	tensión última del acero inoxidable a una temperatura θ
$\varepsilon_{p0.2,\theta}$	deformación total a una tensión $f_{p0.2,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta}$	deformación total a una tensión $f_{p,\theta}$
$\varepsilon_{y,\theta}$	deformación total a una tensión $f_{y,\theta}$
$\varepsilon_{t,\theta}$	deformación total final de la zona plana para una tensión $f_{y,\theta}$
$\varepsilon_{u,\theta}$	deformación última del acero a una temperatura θ
h_c	factor de transferencia de calor por convección
h_{eq}	altura media de todas las aberturas en muros de un recinto
I_z	inercia a flexión de la sección transversal
$k_{p,\theta}$	factor de reducción del límite de proporcionalidad a una temperatura θ con respecto al límite elástico a 20°C. $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$
$k_{y,\theta}$	factor de reducción del límite de elástico a una temperatura θ con respecto al mismo a 20°C. $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$
$k_{E,\theta}$	factor de reducción del módulo de elasticidad a una temperatura θ con respecto al módulo de elasticidad a 20°C. $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E$ para acero al carbono, $k_{E,\theta} = E_\theta / E$ para acero inoxidable

$k_{Ect, \theta}$	factor reductor del módulo tangente en el límite elástico a una temperatura θ con respecto al mismo modulo a 20°C. $K_{Ect, \theta} = E_{p0.2, \theta} / E_{\theta}$
$k_{p0.2, \theta}$	factor de reducción de la tensión correspondiente a una deformación remanente del 0.2% a una temperatura θ con respecto a la misma tensión a 20°C. $k_{p0.2, \theta} = f_{p0.2, \theta} / f_y$
$k_{2, \theta}$	factor de reducción de la tensión para una deformación total del 2% a una temperatura θ con respecto al límite elástico a 20°C. $k_{2, \theta} = f_{2, \theta} / f_y$. Pero con $f_{p0.2, \theta} < f_{2, \theta} < f_{u, \theta}$
$k_{u, \theta}$	factor de reducción de la tensión última a una temperatura θ con respecto a la tensión última a 20°C. $k_{u, \theta} = f_{u, \theta} / f_u$
k_{sh}	factor corrector por efecto de sombra
M_z	esfuerzo de flexión en el eje z-z
N_{cr}	carga crítica teórica de bifurcación de equilibrio
$N_{b,fi,t,Rd}$	resistencia a pandeo en situación de incendio de elementos sometidos a compresión
$q_{t,d}$	Valor de diseño de la densidad de carga de fuego relacionada al área total A_t del recinto
R_d	resistencia de cálculo ante un determinado fenómeno
R_k	valor característico de una determinada resistencia
α	coeficiente de dilatación térmica
θ	temperatura de un elemento estructural
θ_g	temperatura del gas dentro de un recinto
$\Delta\theta_L$	diferencia de temperatura entre puntos sobre la longitud de un elemento
ϕ_{θ}	relación
σ	tensión; constante de Stefan-Boltzmann
λ	coeficiente de conductividad térmica
$\bar{\lambda}_{\theta}$	esbeltez adimensional a una temperatura θ
λ_E	esbeltez de Euler
γ_M	coeficiente parcial global para una resistencia particular
δ	deformación de un elemento sometido a una acción
ρ	densidad
η	función de la configuración deformada de un elemento

Esquema de la tesis

- El CAPÍTULO I. muestra un cuadro general de la historia del acero inoxidable, remarcando aspectos como su descubrimiento y su empleo en la construcción. Muestra también algunas bases de diseño y los objetivos de este estudio.
- El CAPÍTULO II. explica los fenómenos estructurales y térmicos representativos del análisis de pilares a compresión y las nociones generales de los tipos de análisis que pueden llevarse a cabo en estructuras de ese tipo. Además, presenta una breve descripción del comportamiento de un incendio en un espacio interior.
- El CAPÍTULO III. muestra las características más relevantes de los materiales para el estudio ante fuego y las normas que cubren el diseño estructural de los mismos.
- En el CAPÍTULO IV. se expone la modelización numérica, explicando los pasos seguidos para realizar el estudio.
- El CAPÍTULO V. finalmente muestra los resultados del estudio, realizando la comparativa entre el modelo numérico y la normativa, y la comparación que habla de la competitividad de un material sobre otro como elección para un pilar que se diseña ante la acción del fuego. Al final del capítulo se presenta una propuesta de factores para mejorar la fiabilidad que presenta la norma en el diseño ante incendio para acero inoxidable.
- El CAPÍTULO VI, como punto final, resume las respuestas obtenidas del análisis en relación a los objetivos planteados y da consideraciones o recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO I. Introducción

El acero es uno de los materiales más empleados en la construcción, ya sea como materia base de los elementos estructurales o como refuerzo en estructuras de hormigón. Dadas sus múltiples aplicaciones en diferentes industrias, se ha trabajado a lo largo de su historia en conseguir nuevas aleaciones de acero mezclándolo con otros componentes para mejorar su resistencia mecánica o cualquier otra propiedad de interés. Una de esas aleaciones es el acero inoxidable que mejora la resistencia a la corrosión, aunque su nombre no es del todo apropiado ya que puede llegar a oxidarse en función del tipo de acero inoxidable, la corrosividad del ambiente al que este expuesto y otros factores como entallas que abran paso a los agentes corrosivos. El acero inoxidable da solución o mejoras a algunas de las desventajas propias de las estructuras metálicas o del acero al carbono como la ya mencionada resistencia a la corrosión, altos costos de mantenimiento, y se ha observado una mejora en la resistencia al fuego respecto a su homólogo acero al carbono, hipótesis que será estudiada con resultados numéricos en este documento. Debido a su historia relativamente nueva, la poca compresión hasta hace poco de sus propiedades y la falta de normativas completas han hecho que el uso del acero inoxidable no sea tan extendido en la construcción; actualmente las normativas que cubren su empleo son la EN 1993-1-2 y las normas suplementarias encontradas en la EN 1993-1-4, pero su tratamiento sigue siendo escaso y bajo la asunción de que se comporta igual que el acero al carbono, por lo que este estudio busca profundizar más en el comportamiento real del acero inoxidable ante fuego y bifurcar la línea de diseño para ambos materiales de ser necesario. Al no contar con datos experimentales se realiza una simulación numérica como referencia y como modelo representativo de la realidad, bajo la hipótesis de una distribución homogénea de temperaturas en un pilar biapoyado sometido a un esfuerzo axial de compresión y otra simulación numérica que reproduce la acción del fuego sobre el pilar. Existe una amplia gama de aceros inoxidables y aceros al carbono según su composición química, por lo que para simplificar el estudio se tomarán dos tipos de acero inoxidables: austenítico I 1.4301 y el ferrítico II 1.4003, y del acero al carbono el S275 por ser los más utilizados y de límite elástico similares. Finalmente, de los resultados obtenidos se remarcan las diferencias entre el modelo numérico y las normas respecto al acero inoxidable principalmente, y se presentan conclusiones sobre la idoneidad del uso de un material sobre otro ante la acción del fuego.

1.1 Antecedentes

A principios del siglo XIV los ingleses Stoddard y Farraday y otros investigadores notaron que las aleaciones de hierro (Fe) y cromo (Cr) eran más resistentes a determinados ácidos, pero al tratar de aumentar esta resistencia fallaron en intentar producir aleaciones con altas cantidades de cromo. En 1872 los ingleses Woods y Clark registran la primera patente del acero inoxidable; posteriormente el francés Brüstlein apunta la importancia del bajo contenido de carbono (C) para lograr aleaciones de cromo superiores. Varios avances y descubrimientos siguieron a las siguientes décadas, surgiendo nuevas aleaciones con níquel (Ni) y molibdeno (Mo), siendo el inglés Harry Brearley uno de los más importantes en este periodo por sus experimentos con aleaciones de diferentes contenidos de cromo y hierro, y en darle un uso comercial; fueron él y su amigo Ernest Stuart los primeros en emplear el término “acero inoxidable” nombrado así Brearley el inventor del acero inoxidable. Aunque existen diferentes denominaciones de aceros según su composición y tipo

de estructura interna, el término acero inoxidable se usa ahora para englobar todas las aleaciones de hierro resistentes a la corrosión que poseen un porcentaje mínimo de 10.5% de cromo y máximo 1.2% de carbono. En los inicios del siglo XX se empezó a usar el acero inoxidable en varias industrias, pero no fue hasta finales del siglo que empezó su inserción en la construcción al ser empleada por arquitectos e ingenieros. El acero inoxidable por su buen acabado superficial es muy empleado en composiciones arquitectónicas, pero además de esta cualidad otras más respaldan su utilización como material estructural, ya que posee una excelente ductilidad, alto valor residual y un competitivo coste de ciclo de vida. Al suprimir la necesidad de recubrimientos contra la corrosión, reduce los costos de mantenimiento, impacto ambiental y peso en la estructura, compensando así el alto coste de adquisición y haciéndolo una solución más rentable. Sin embargo, hoy en día su uso no se ha extendido mucho para elementos estructurales debido a la falta hasta hace poco de una guía o código de diseño estructural como normativa. En su historia, el alto costo del material había limitado su uso principalmente a aplicaciones especializadas, pero con el surgimiento de códigos de diseño, un mejor conocimiento de los beneficios del material y una transición hacia la sostenibilidad (creación de aceros más baratos), se está logrando un uso más generalizado en las estructuras. Actualmente se cuenta con una normativa con reglas suplementarias para el acero inoxidable (EN 1993-1-4 [1]), pero en su mayoría se siguen usando las reglas definidas para el acero al carbono, como ocurre con el tratamiento frente a incendio, para el que no existe normativa para el acero inoxidable. Aunque ambos materiales tienen ciertas similitudes en su comportamiento, han demostrado requerir un tratamiento diferente en el diseño estructural.

1.2 Objetivos

El objetivo principal es evaluar el comportamiento a fuego de pilares sometidos a esfuerzo axial de compresión, empleando acero inoxidable, y como comparación empleando acero al carbono. Utilizando un modelo numérico y las normas de construcción, se tiene como objetivos específicos:

1. Realizar un análisis mecánico a distintas temperaturas, determinando la resistencia última a compresión del pilar y empleando diferentes esbelteces.
2. Realizar un análisis de cómo se comporta el pilar ante la acción de un incendio simulado, determinando el tiempo resistente antes del fallo estructural y bajo diferentes coeficientes de utilización inicial.
3. Comprobar la fiabilidad de las normas para acero inoxidable, comparando estas con los resultados obtenidos del modelo numérico.
4. Establecer una comparativa entre el acero inoxidable y el acero al carbono como material de elección para un pilar en la comprobación ante incendio.

Como objetivo secundario se pretende realizar una primera aproximación a una propuesta de modificación en las funciones analíticas de las normativas existentes para mejorar su fiabilidad.

1.3 Bases de diseño

1.3.1 Estados límite últimos

Corresponden a las situaciones en las que, en caso de ser superadas la estructura puede colapsar en parte o totalmente. De manera general en un pilar el efecto que condiciona el dimensionamiento del mismo es el pandeo por flexión, naturalmente se debe satisfacer que la resistencia a este fenómeno de inestabilidad sea mayor que las cargas aplicadas, o en otras palabras que en el dominio de la resistencia se cumpla la siguiente condición para pandeo:

$$R_d \geq E_d \quad (1.1)$$

La resistencia de diseño viene dada por la ecuación (1.2)

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (1.2)$$

donde R_k es el valor característico de una determinada resistencia y el factor γ_M es el coeficiente parcial global para una resistencia particular [2]. Los valores de (1.1) adoptarán el subíndice “fi” en situación de incendio [3], y para el coeficiente parcial del acero se recomienda un valor $\gamma_{M,fi} = 1.0$ [4]. Para la obtención de E_d se utilizarán los valores de cálculo correspondiente a una situación accidental dados por la ecuación (1.3) [5].

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G_{k,j}^* + \gamma_A A_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1.3)$$

Siendo “ G_k ” y “ G_k^* ” los valores característicos¹ de las acciones permanentes en el tiempo de valor constante y de valor no constante respectivamente, mientras “ Q_k ” es para las acciones variables en el tiempo; “ A_k ” el valor característico de acciones con poca probabilidad de ocurrencia a lo largo de la vida del edificio pero de magnitud relevante. Dada la variación del valor de Q_k a lo largo del tiempo, su valor máximo es poco probable que actúe concomitante a las demás acciones y por tanto se emplean los coeficientes de simultaneidad “ $\Psi_{1,1}$ ” y “ $\Psi_{2,i}$ ” cuyo valor dependerá del tipo de acción, finalmente los coeficientes parciales γ se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Coeficientes parciales para las acciones [5]

Tipo de acción	Situaciones persistentes o transitorias		Situaciones accidentales	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.35$	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.00$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1.00$	$\gamma_{G^*} = 1.00$	$\gamma_{G^*} = 1.00$	$\gamma_{G^*} = 1.00$
Variable	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.50$	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.00$
Accidental	-	-	$\gamma_A = 1.00$	$\gamma_A = 1.00$

¹ Valor de referencia determinado por criterios estadísticos que corresponde a una probabilidad de no ser superado.

1.3.2 Tipos de secciones transversales

Es necesario establecer condiciones para evitar que fenómenos no relacionados al estudio tomen efecto o protagonismo. La clasificación de las secciones está determinada por su susceptibilidad al fenómeno de abolladura, que es un fenómeno local en elementos comprimidos que limita la capacidad resistente del mismo, y se describen de la siguiente manera:

- Secciones Clase 1: pueden alcanzar su resistencia plástica sin presentar abolladura y permiten un análisis global plástico ya que cumple con la capacidad de rotación requerida para una rótula.
- Secciones Clase 2: también alcanzan su resistencia plástica pero debido al fenómeno de abolladura su capacidad de rotación se reduce y no permiten un análisis global plástico.
- Secciones Clase 3: no pueden alcanzar el límite elástico en todas sus fibras debido a la abolladura y por tanto deben tratarse mediante una distribución de tensiones elásticas; su resistencia está determinada por la plastificación de su fibra comprimida más solicitada.
- Secciones Clase 4 (esbeltas): el fenómeno de abolladura se presenta antes de que la fibra comprimida más solicitada plastifique, reduciendo su capacidad resistente. Se tratan mediante una distribución de tensiones elásticas, pero con las propiedades de una sección reducida.

La Figura 1.1 muestra el comportamiento momento-rotación de las secciones descritas anteriormente.

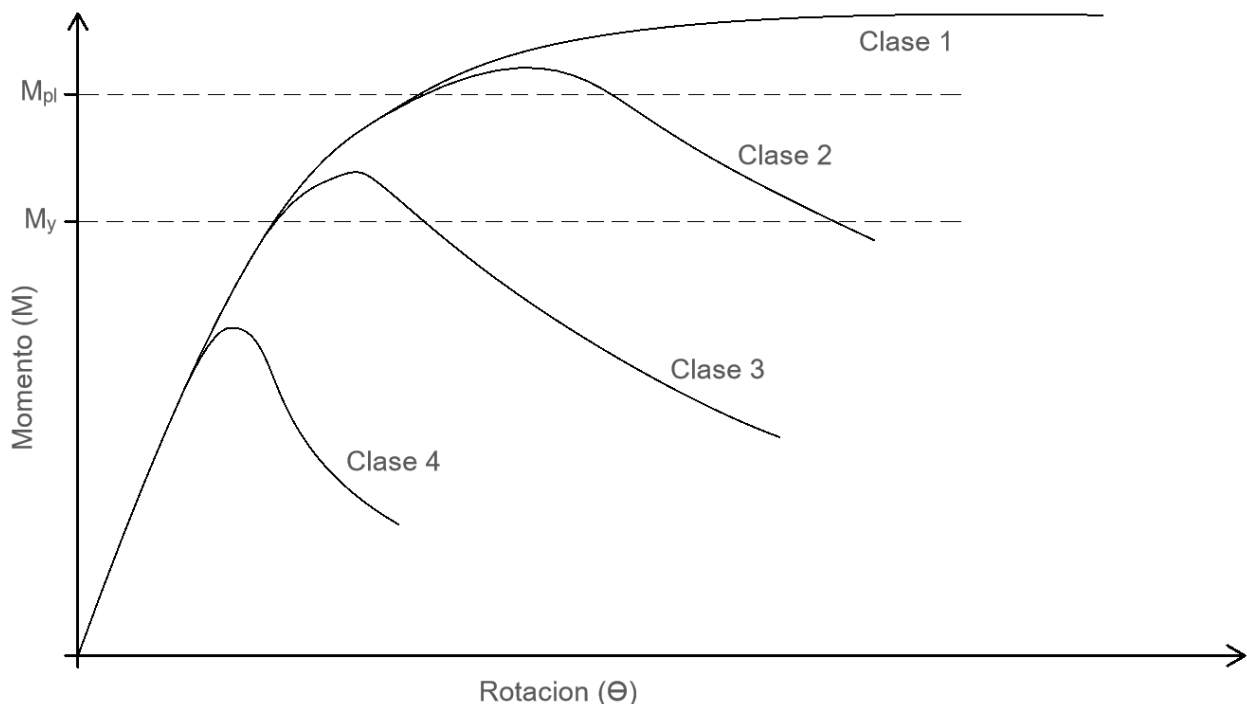
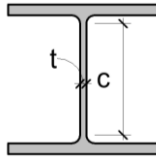
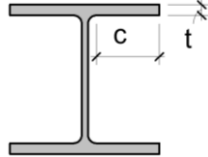


Figura 1.1 Diagrama momento-rotación de las clases de sección

Para determinar qué tipo de sección es, se seguirá el procedimiento especificado en EN 1993-1-1 [2] para acero al carbono y el procedimiento de EN 1993-1-4 [1] para acero inoxidable, en los cuales se muestran los rangos para clasificar la sección según la esbeltez de sus paneles c/t resumidos en la Tabla 1.2 para una sección doble T.

Tabla 1.2 Rangos de clasificación de secciones sometidas únicamente a compresión para acero al carbono y acero inoxidable [2], [1].

Tipo de sección	Condición para clasificación				Panel interior	Panel saliente
	Acero al carbono		Acero inoxidable			
	Alma	Alas	Alma	Alas		
Clase 1	$c/t \leq 33\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 25.7\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$		
Clase 2	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 26.7\varepsilon$	$c/t \leq 9.4\varepsilon$		
Clase 3	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 30.7\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$		

El cálculo del factor épsilon de manera simplificada se hace usando la ecuación (1.4), pero esta expresión tomará diferente forma según el material y ante situación de incendio como se mostrará en capítulos posteriores.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (1.4)$$

CAPÍTULO II. Estado del conocimiento: comportamiento mecánico y térmico de los elementos estructurales

Considerando un elemento sometido a una tensión axial de compresión, para analizar su respuesta según la mecánica de sólidos deformables, es necesario conocer las relaciones de las ecuaciones de equilibrio, constitutivas del material (relación entre tensiones y deformaciones) y las ecuaciones de compatibilidad (relación entre desplazamientos y deformaciones). La Figura 2.1 muestra los diferentes comportamientos según las consideraciones que se tomen y se describen según la línea analizada como sigue:

1. Esta gráfica supone un comportamiento totalmente lineal del material en la que siempre se cumpla la ley de Hooke (análisis lineal).
2. Muestra la existencia de una carga crítica N_{cr} en el elemento que lo hace alcanzar un equilibrio indiferente (ver 2.2)
3. Se tiene en cuenta que las piezas reales tienen formas imperfectas y se plantea el equilibrio sobre la configuración deformada de la pieza bajo un proceso incremental de carga (análisis en segundo orden); su tendencia será acercarse a N_{cr} teniéndolo como límite superior (ver apartado 2.3).
4. Los materiales no se comportan lineal totalmente, normalmente alcanzan un límite elástico y posteriormente pierden rigidez a medida que plastifican (algunos ganan rigidez luego por endurecimiento por deformación; análisis plástico).
5. Se consideran los efectos descritos en 3 y 4 (análisis plástico en segundo orden).

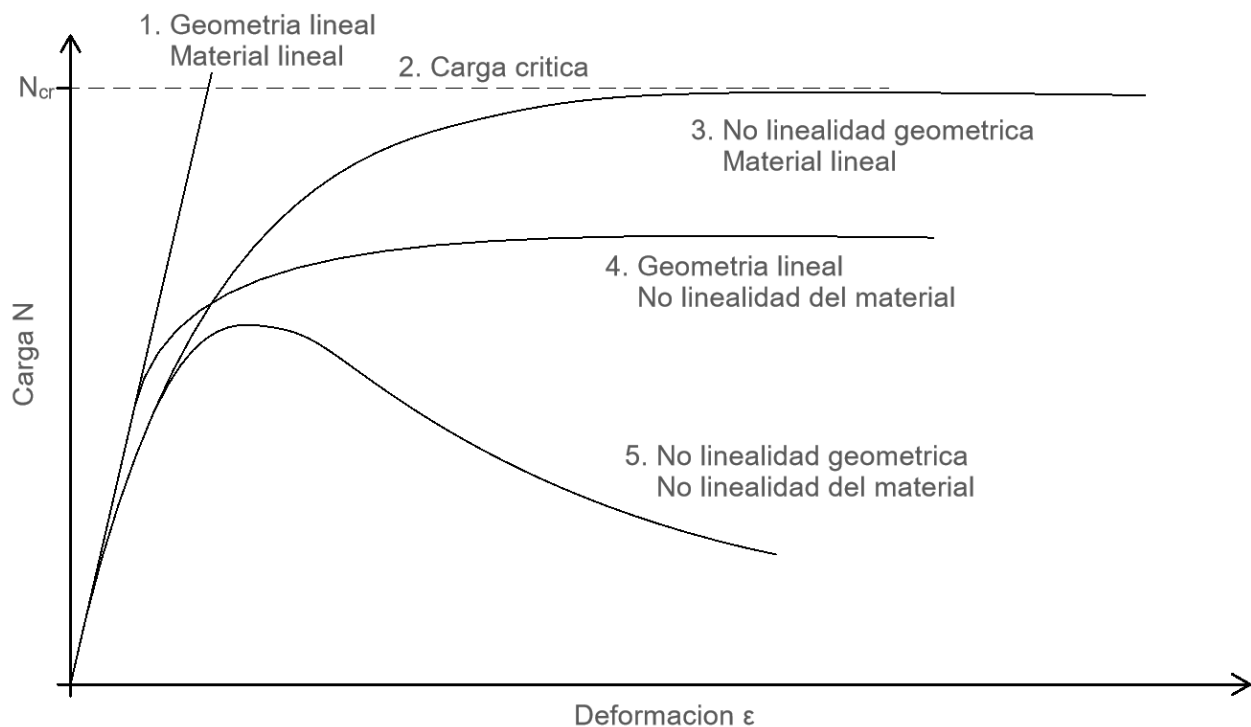


Figura 2.1 Gráfica del comportamiento de los elementos según el tipo de análisis y consideraciones tomadas

Del análisis del comportamiento de los elementos descritos anteriormente, destacan dos tipos de análisis estructural y dos no linealidades a tener en cuenta en los mismos.

Cuando un elemento se deforma debido a la actuación de cargas, estas últimas ejercen unos esfuerzos secundarios derivados de la misma deformación (efectos de segundo orden); tener en cuenta o no estos efectos dependerá de su influencia en los resultados, en caso de que puedan y sean despreciados se dice que es un análisis en primer orden, si no pueden despreciarse y por tanto deben considerarse, entonces se habla de un análisis en segundo orden.

2.1 Elasticidad lineal

Un sólido deformable es aquel que, ante la actuación de cargas o efectos térmicos sobre el sufre una deformación (recuperable o no). Cuando esta deformación es recuperable se dice que tiene un comportamiento elástico, pero cuando existe una deformación remanente luego de quitar las acciones se dice que tiene un comportamiento plástico. Si la relación entre las acciones y las deformaciones en respuesta a las primeras es constante, entonces el elemento tiene una conducta elástico lineal en la que se cumple la ley de Hooke y la ecuación constitutiva en esa zona tiene la forma de $\sigma = E\varepsilon$ (análisis elástico).

2.2 Carga de bifurcación del equilibrio

Existen tres tipos de equilibrio: el equilibrio estable, inestable o indiferente. Tomando de referencia el elemento biarticulado de la Figura 2.2, lo separamos inicialmente una distancia “y” (mediante una carga transversal u otro método) y cargamos con un axil N, al quitar la separación se obtendrán tres casos en función de la magnitud de la carga y que corresponden a los tipos de equilibrio mencionados:

- Equilibrio indiferente: Si cargamos para un valor de $N=N_{cr}$ y luego quitamos la separación, la pieza se mantendrá en equilibrio bajo la configuración deformada “y”.
- Equilibrio estable: cuando $N < N_{cr}$, al soltar la pieza esta volverá a su posición lineal sin deformación “y”.
- Equilibrio inestable: si $N > N_{cr}$, al soltar el elemento este seguirá deformándose más allá de “y”.

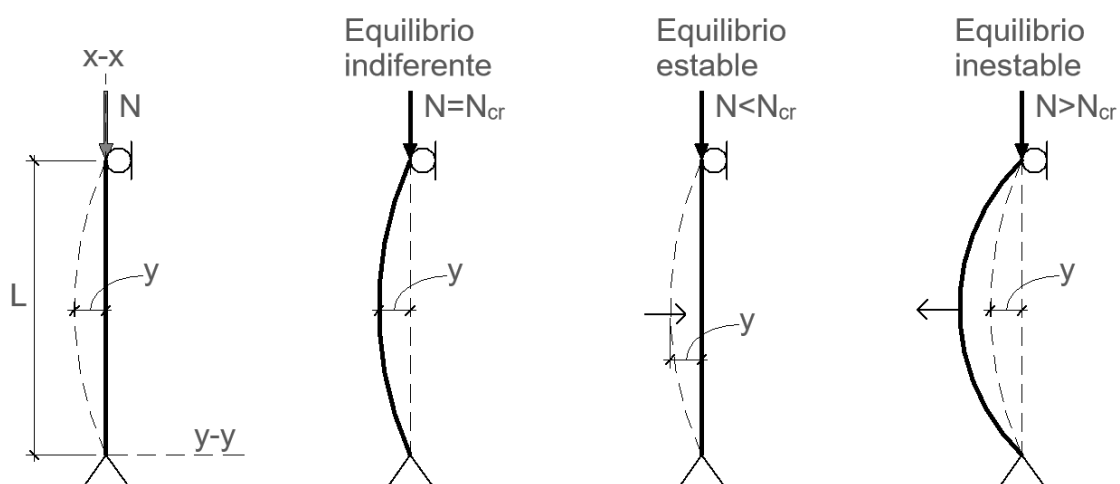


Figura 2.2 Pilar cargado con un axil “N” y una separación “y”

A esta carga N_{cr} se le conoce como carga de bifurcación del equilibrio, ya que es el punto medio entre un equilibrio estable y un equilibrio inestable.

2.3 No linealidad geométrica

Generalmente se plantea el equilibrio sobre la geometría inicial de las estructuras y se obtienen los esfuerzos y deformaciones bajo la combinación de acciones aplicadas (Figura 2.3 (a)); pero al plantearse el equilibrio sobre la configuración deformada debido a las cargas actuantes, surgen otros efectos que aumentan los esfuerzos obtenidos en el cálculo inicial (Figura 2.3 (b)).

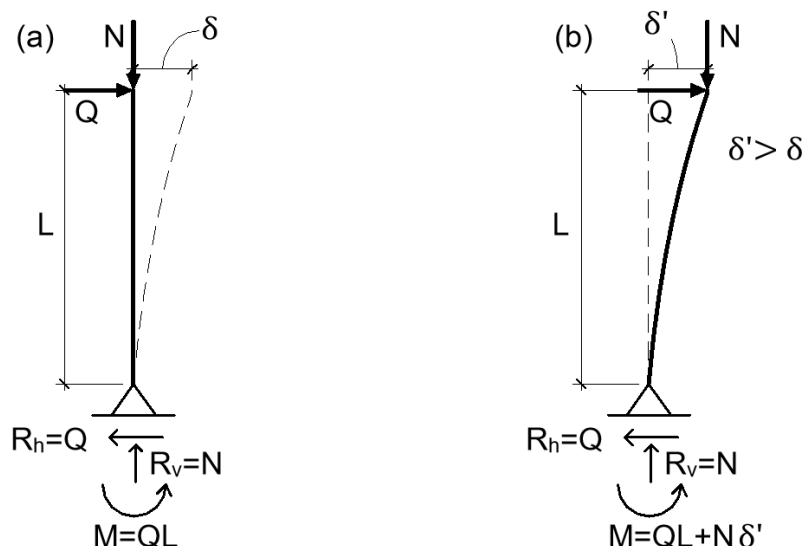


Figura 2.3 Ejemplo de efectos de segundo orden

Cuando los efectos de segundo orden son despreciables puede realizarse un análisis en primer orden de la estructura, caso contrario tendrán que tenerse en consideración ya sea mediante una amplificación de esfuerzos o mediante un proceso iterativo que generalmente es asistido por ordenador (ver CAPÍTULO IV).

2.4 Pandeo por flexión

Planteando la ecuación diferencial elástica en la hipótesis de equilibrio indiferente del elemento de la Figura 2.2 donde $N=N_{cr}$ se obtiene que [6]:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-M_z}{EI_z} = \frac{-N_{cr} \cdot y}{EI_z} \quad \text{Y por tanto} \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{N_{cr}}{EI_z}y = 0$$

La solución general de la ecuación (2.1) es $y = C_1 \operatorname{sen}\left(x \cdot \sqrt{\frac{N_{cr}}{EI_z}}\right) + C_2 \cos\left(x \cdot \sqrt{\frac{N_{cr}}{EI_z}}\right)$, como en $x=0$, $y=0$ por las condiciones de contorno entonces $C_2=0$. Cuando $x=L$, $y=0$ y la solución pasa por $C_1=0$ que es la solución elástica lineal sin deformación del elemento, o por la solución en la que:

² El planteamiento se realizó desplazando el pilar una distancia “y”, pero desplazándolo una distancia “z” se llega a la misma conclusión, pero con la inercia en el eje y-y. El pilar pandeara en el plano donde tenga la menor rigidez a flexión.

$$\text{sen} \left(L \cdot \sqrt{\frac{N_{cr}}{EI_z}} \right) = 0 \quad \text{Es decir} \quad (2.2)$$

$$L \cdot \sqrt{\frac{N_{cr}}{EI_z}} = n\pi \quad \text{Para } n = (1, 2, 3, 4, \dots)$$

Tomando el primer valor de $n=1$ que corresponde al primer modo de pandeo de la pieza, se obtiene una carga crítica de $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$, conocida como la carga crítica de Euler por ser quien llevo a su planteamiento.

2.4.1 Longitudes de pandeo

Colocando diferentes condiciones de contorno y siguiendo el mismo planteamiento explicado, se llega a la misma expresión de carga crítica, pero con la variación de la longitud del denominador, al cual se le denomina longitud crítica y por tanto es mejor expresar la carga de crítica como en la ecuación (2.3) de manera más general.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (2.3)$$

Definiendo la longitud crítica como $L_{cr} = \beta L$ se pueden obtener los valores de β para diferentes condiciones de apoyos (ver Figura 2.4).

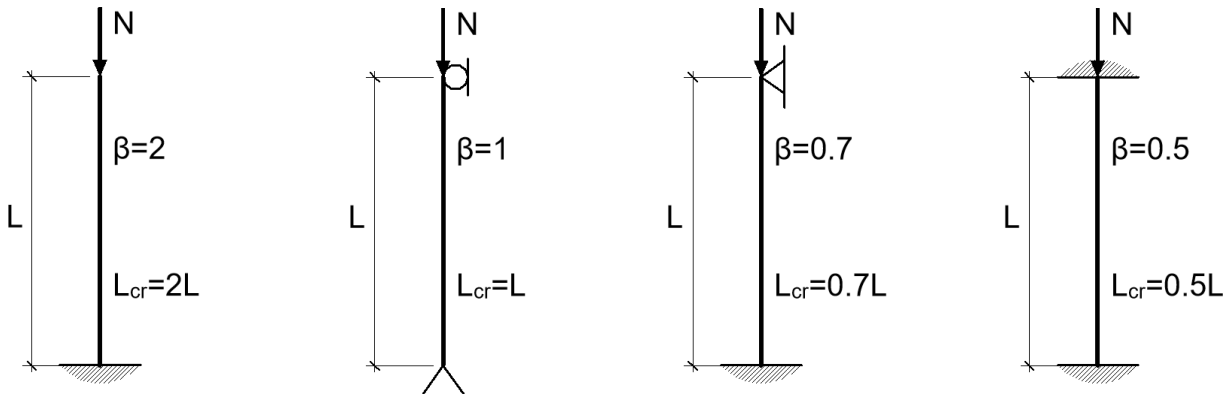


Figura 2.4 Valores de L_{cr} para diferentes condiciones de apoyo

2.4.2 Tensión crítica de Euler

Si obtenemos la tensión sobre la sección cuando actúa la carga crítica de Euler N_{cr} y sabiendo que $I = Ai^2$ y que $\lambda = L_{cr}/i$, donde i es el radio de giro de la sección transversal (se usa el menor radio de giro que representa la menor inercia y por tanto por donde pandeara el elemento), se puede expresar la tensión crítica en función de la esbeltez de la sección como se muestra en la ecuación (2.4).

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2 A} = \frac{\pi^2 E Ai^2}{L_{cr}^2 A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

Si graficamos la expresión anterior obtenemos gráficamente la curva de Euler (ver Figura 2.5). Es de notar que, considerando el límite elástico del material, existe una esbeltez límite para la cual las

esbelteces menores producen la plastificación antes de que se produzca el pandeo; se llama a esta esbeltez límite esbeltez de Euler, descrita en la ecuación (2.5).

$$f_y = \frac{\pi^2 E}{\lambda_E^2} \text{ por tanto } \lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.5)$$

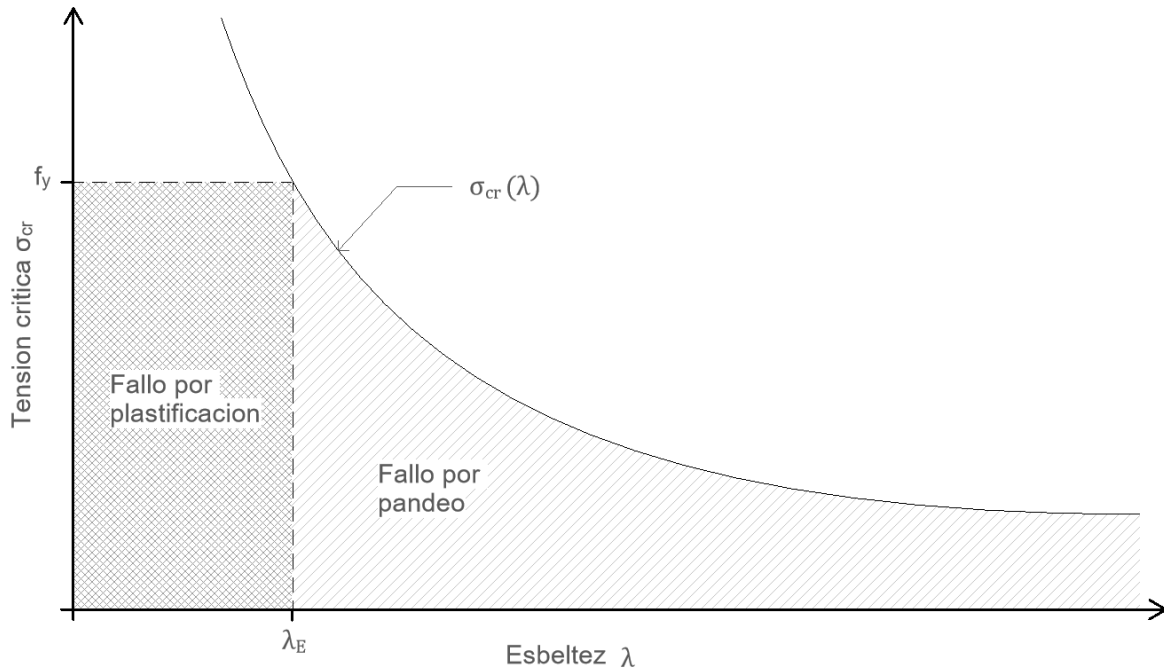


Figura 2.5 Parábola de Euler

2.4.3 Imperfecciones iniciales

El comportamiento real de un pilar difiere del análisis presentado con anterioridad; las piezas reales tienen imperfecciones geométricas iniciales (falta de rectitud, verticalidad, excentricidades en el montaje) y tensiones residuales que provocan esas diferencias, además de posibles excentricidades en la aplicación de las cargas. Mediante estudios experimentales que si consideran todos los factores mencionados con anterioridad, se han obtenido los resultados de la Figura 2.6; es más conveniente expresar el eje de las ordenadas como un parámetro $\chi = \sigma_{cr}/f_y$ y el eje de las

abscisas como una esbeltez adimensional $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E} = \frac{L_{cr}}{i\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{i\pi} \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{N_{cr}}} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$ para generalizarla.

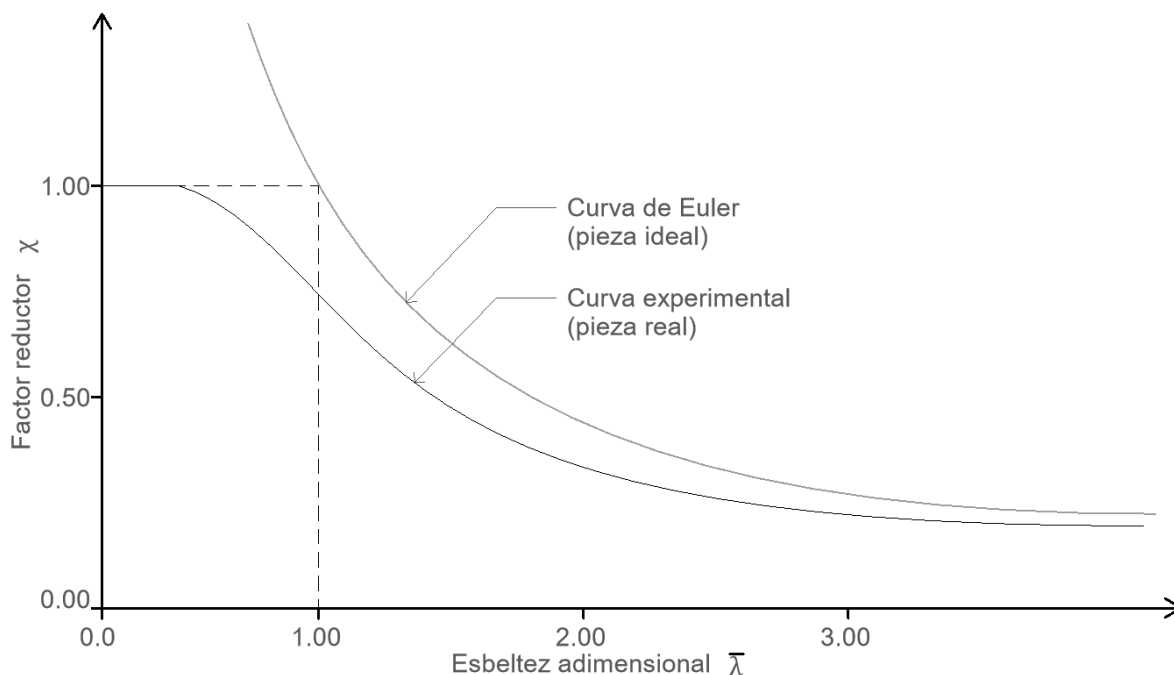


Figura 2.6 Curvas de pandeo experimentales [7]

Las diferencias entre el pandeo teórico y el real demuestran que es necesario considerar las imperfecciones (apartado 2.4.5) ya que su efecto es significativo, además existen diferencias entre los tipos de sección en la forma de la curva y que se recogen en las curvas europeas de pandeo.

2.4.4 Curvas europeas de pandeo

Asumiendo una imperfección inicial de forma media onda senoidal, que tome en cuenta los efectos de todas las imperfecciones (geométricas y tensionales), mediante un análisis en segundo orden, se pueden obtener las formulaciones analíticas de las curvas de pandeo utilizadas en EN 1993-1-1 (ver ecuaciones (3.5) y (3.6)) [6].

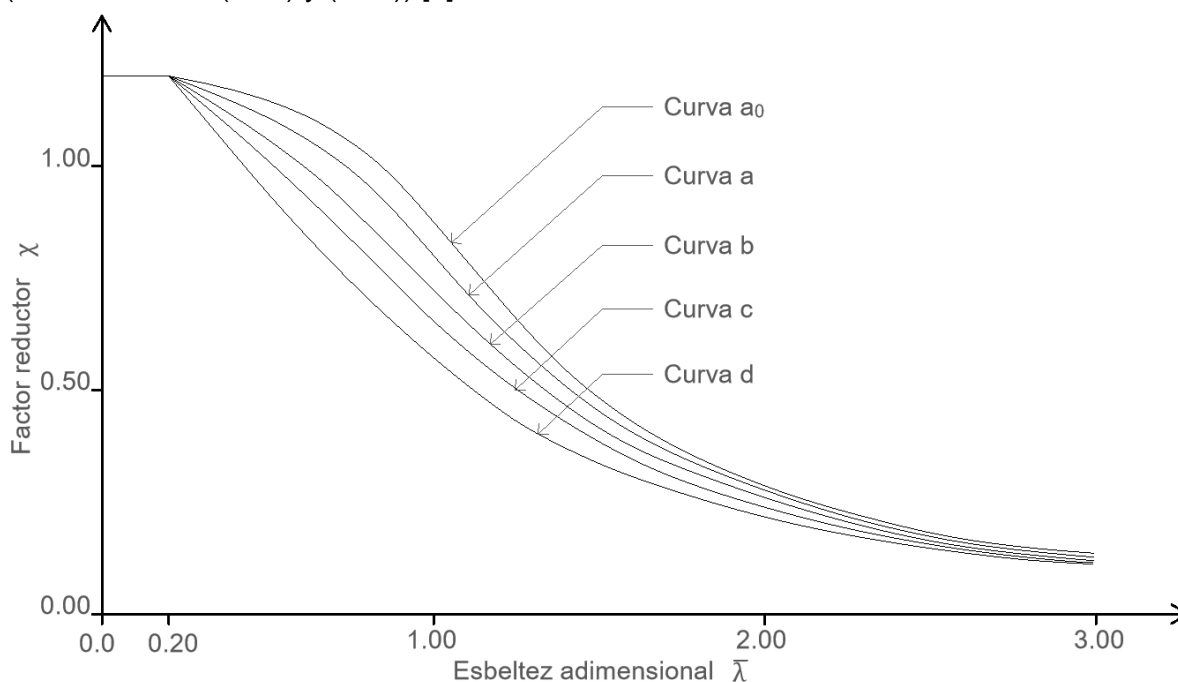


Figura 2.7 Curvas europeas de pandeo [2]

Las diferencias en las tensiones residuales de los diferentes tipos de perfiles generan las diferentes curvas mostradas en la Figura 2.7.

2.4.5 Consideración de las imperfecciones

Una forma de tener en cuenta las imperfecciones iniciales mencionadas en el apartado 2.4.3 es a través de un sistema de imperfecciones geométricas equivalentes locales y globales (e_0, ϕ) ; alternatively se puede emplear una deformada afín al modo de pandeo de la combinación de acciones determinada. La amplitud de la configuración deformada inicial para un soporte biarticulado en la sección crítica es de $\eta_{inici,script} = e_0$ dado que $N_{cr}\eta_{cr} = EI\eta''_{cr,max}$, en donde e_0 se calcula de la siguiente manera [2]:

$$e_0 = \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi\bar{\lambda}^2/\gamma_{M1}}{1 - \chi\bar{\lambda}^2} \quad (2.6)$$

2.5 No linealidad del material

Consiste básicamente en una relación no lineal de la ecuación constitutiva en la que la pendiente de la recta tangente (módulo de rigidez) es diferente en cada punto de deformación. Generalmente corresponde a un comportamiento plástico con deformaciones permanentes a la cual se asocia una pérdida de rigidez. El acero, así como la mayoría de los metales, tiene un comportamiento elasto-plástico con una zona lineal y otra plástica (ver Figura 3.1 y Figura 3.8).

2.6 Temperatura y calor

Si además de las condiciones mecánicas del pilar descritas al inicio del capítulo consideramos que el elemento está sometido a efectos térmicos como la acción del fuego, el sistema entero debe analizarse como un sistema termodinámico que intercambia energía con su entorno.

2.6.1 Esfuerzo térmico

La mayoría de los materiales se expanden en todas las direcciones al incrementar la temperatura. El incremento de longitud experimentado por un cuerpo en una de estas direcciones es lo que se conoce como expansión lineal. Cuando el cambio de temperatura $\Delta\theta$ es pequeña, el aumento en la longitud ΔL es proporcional a $\Delta\theta$ y se puede decir que

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta\theta \quad (2.7)$$

donde α es el coeficiente de dilatación térmica. Si el elemento se encuentra sin restricciones mecánicas, éste se expande como lo determina la ecuación (2.7), pero si se restringen los desplazamientos en los extremos se generan esfuerzos térmicos por la tercera ley de newton; al elemento querer expandirse o contraerse, los mecanismos de restricción deben ejercer un esfuerzo sobre el sistema que impida el desplazamiento como se muestra en la Figura 2.8 (b). Dicho esfuerzo puede calcularse relacionando la ecuación (2.7) con la constitutiva del material ya que la deformación es $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta\theta$.

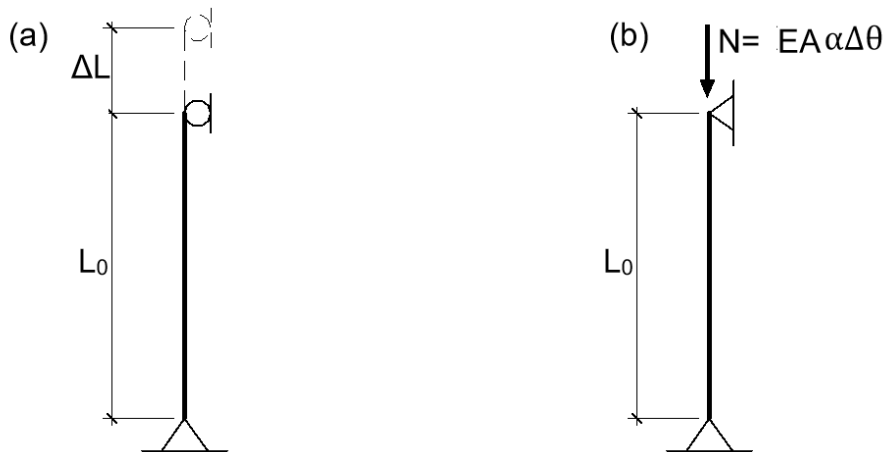


Figura 2.8 Pilar sometido a un incremento de temperatura $\Delta\theta$ con su extremo libre (a) y con sus extremos restringidos (b)

2.6.2 Calor específico

Cuando un objeto se ve sometido a una diferencia de temperatura, se produce una transferencia de energía de un cuerpo a otro la cual se denomina transferencia de calor. El calor es por tanto la energía en flujo de un sistema a otro. Se puede cuantificar la cantidad de energía necesaria para elevar 1°C la temperatura de un kilogramo de masa de un material en específico; esta cantidad se llama calor específico y se mide en J/kg(K) ; así, un cuerpo de ciertas dimensiones y sometido a una diferencia de temperatura, eleva más su temperatura que otro con las mismas condiciones, si el material posee un calor específico mayor.

2.6.3 Mecanismos de transferencia de calor

Existen varias formas en las que la transferencia de calor entre dos o más cuerpos puede realizarse:

- **Conducción:** la energía se transfiere a través del material por medio de las interacciones internas de los átomos con energía cinética mayor que la de sus vecinos; de manera que un pilar sometido a fuego en uno de sus extremos terminara teniendo al final del proceso de transferencia la misma temperatura en todos sus puntos, aunque inicialmente solo el extremo expuesto tenía una temperatura mayor. La cantidad de calor que se mueve por unidad de tiempo, por unidad de longitud y por gradiente térmico se denomina conductividad térmica. La conductividad térmica expresa lo rápido que se extiende la energía a través del material a otras regiones del mismo y se representa con λ de unidades W/m(K) donde $1\text{W}=\text{J/s}$.
- **Convección:** esta transferencia se debe al calor transmitido por un fluido que se calienta y viaja de una región del espacio a otra calentando otro cuerpo. Ejemplo de ello es el flujo de aire caliente que se mueve a otras regiones por diferencias de densidad y calienta los elementos de su entorno. Este tipo de calor depende del área superficial expuesta al fluido y del coeficiente de transferencia de calor conocido como factor de convección h_c ($\text{W/m}^2\text{K}$) que dependerá de la viscosidad del fluido.

- Radiación: la transferencia de calor se realiza por ondas electromagnéticas que emiten los cuerpos a cualquier temperatura, incluso a temperatura ambiente. El ritmo de transferencia de energía sigue la ley de Stefan-Boltzmann siendo proporcional al área superficial, a la cuarta potencia de la temperatura T del cuerpo, a la constante de Stefan-Boltzmann σ y a una propiedad del área superficial conocida como emisividad e . Un ejemplo claro de este tipo de calor es la energía solar que llega a nosotros a través del espacio vacío por ondas electromagnéticas. Aunque el cuerpo pierda energía por radiación también absorbe energía del ambiente por la radiación de éste.

Las siguientes expresiones muestran las relaciones descritas anteriormente:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \frac{\lambda A}{L} (\Delta\theta_L) && \text{Flujo de calor por conducción donde } \Delta\theta_L \text{ es la diferencia de} \\ &&& \text{temperatura interna de un punto a otro en la longitud} \\ \\ \frac{dQ}{dt} &= h_c A_s (\theta - \theta_g) && \text{Flujo de calor por convección} \\ \\ \frac{dQ}{dt} &= A_s e \sigma (\theta^4 - \theta_g^4) && \text{Flujo de calor por radiación} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Un elemento estructural sometido a la acción de fuego directa o indirectamente, recibirá transferencia de calor por convección al calentarse el aire circundante a él, luego por conducción cada una de sus partes irá elevando su temperatura partiendo del punto de contacto con el aire caliente, a su vez el elemento radiará energía por ondas electromagnéticas pero recibirá también energía por radiación del ambiente (ver Figura 2.9); después de un tiempo determinando el elemento tenderá a una temperatura constante en toda su longitud y en equilibrio térmico con su entorno.

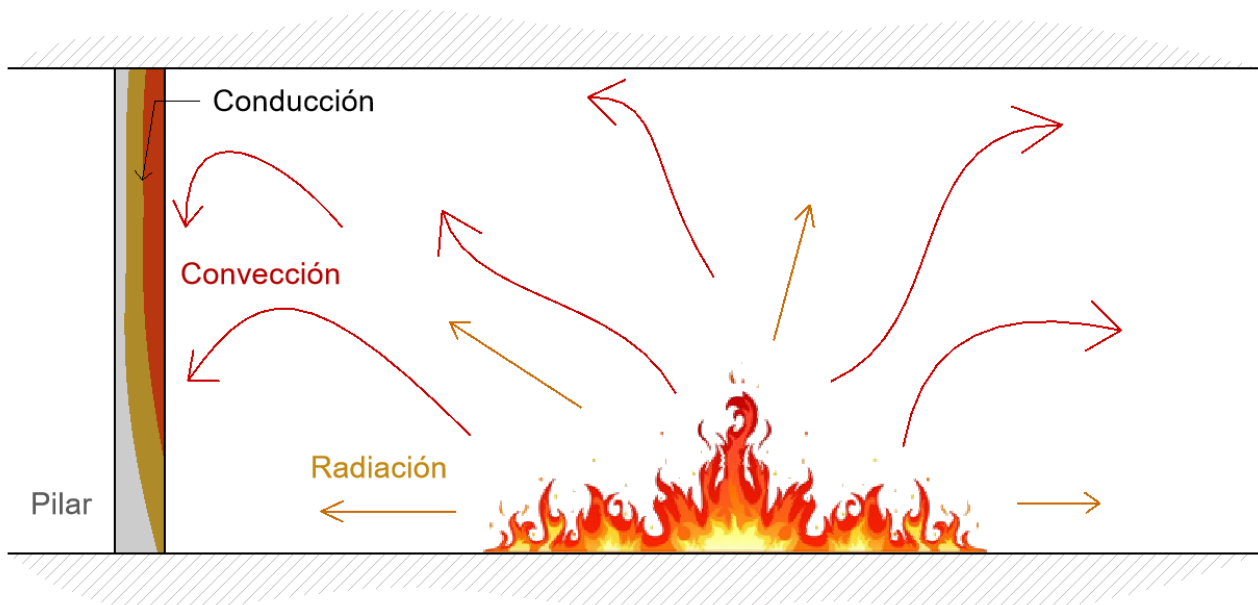


Figura 2.9 Transferencia de calor sobre un pilar en situación de incendio

Si se busca obtener la temperatura de un elemento en función del tiempo teniendo en cuenta todos los mecanismos de transferencia de calor antes mencionados, deberá obtenerse primero el incremento de energía dQ que requiere el sistema para elevarse una cantidad infinitesimal de temperatura $d\theta$ por medio del calor específico (c)

$$dQ = \rho V c d\theta \quad (2.9)$$

Posteriormente se encuentra la cantidad de energía suministrada al sistema por los mecanismos de transferencia de calor en un incremento infinitesimal de tiempo dt .

$$dQ = [h_c A_s (\theta - \theta_g) + A_s e \sigma (\theta^4 - \theta_g^4)] dt \quad (2.10)$$

La temperatura del elemento entonces en función del tiempo se obtiene igualando la ecuación (2.9) y (2.10).

$$\rho V c d\theta = A_s [h_c (\theta - \theta_g) + e \sigma (\theta^4 - \theta_g^4)] dt \quad (2.11)$$

La resolución de la ecuación diferencial (2.11) es un proceso complejo, por lo que se aproxima mediante un método numérico tomando incrementos $\Delta\theta$ y Δt en lugar de incrementos infinitesimales. Este método es el que se encuentra en EN 1993-1-2 [4]. Fijando incrementos no mayores a cinco segundos en un proceso incremental y recursivo, se puede encontrar la temperatura a cualquier tiempo $t = n\Delta t$, empleando la ecuación (2.12).

$$\theta = \sum_{n=1}^m \theta_n = \sum_{n=1}^m \frac{A_s}{\rho V c_{(\theta_{n-1})}} [h_c [\theta_{n-1} - \theta_{g(n\Delta t)}] + e \sigma [(\theta_{n-1})^4 - \theta_{g(n\Delta t)}^4]] \Delta t \quad \Delta t \leq 5s \quad (2.12)$$

El termino $\theta_{g(n\Delta t)}$ en la ecuación (2.12) indica que el valor es el evaluado en $n\Delta t$.

2.6.4 Efecto de sombra y radiación en cavidad

Este efecto se genera debido a la geometría de los elementos de sección abierta como los doble T utilizados habitualmente en construcción metálica. Las ondas electromagnéticas provenientes del fuego en las superficies incendiadas llegan al pilar como se muestra en la Figura 2.10 (a); debido a la forma del mismo, más cantidad de ondas inciden en las caras externas de las alas y en las caras del alma, pero una menor cantidad lo hacen sobre las caras internas de las alas. Aun si la fuente de radiación se encuentra lejos de manera que puedan considerarse los rayos incidentes casi perpendiculares al alma (Figura 2.10 (b)), las caras internas del ala siguen teniendo menor incidencia.

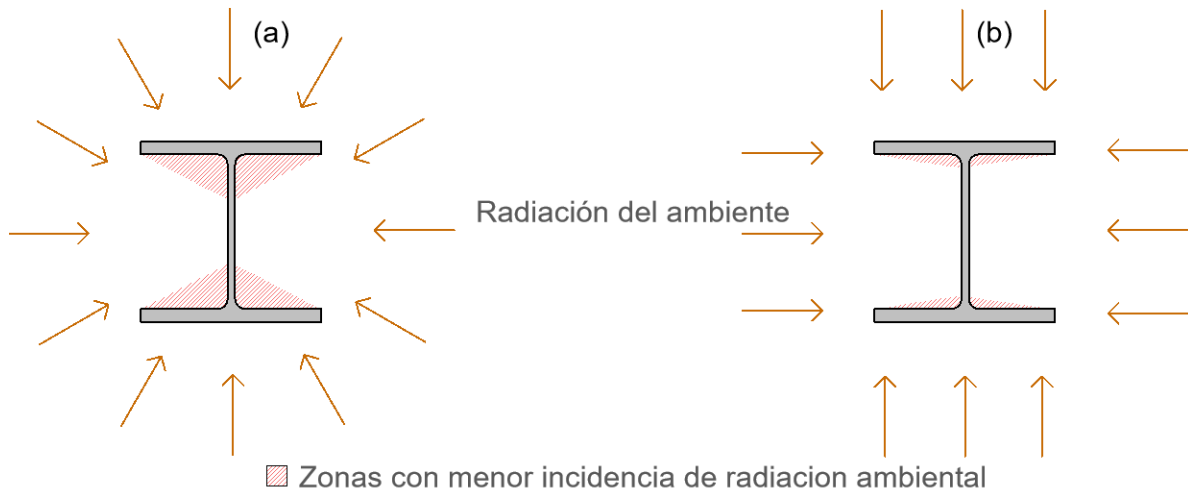


Figura 2.10 Efecto de sombra en secciones abiertas

EN 1993-1-2 [4] toma en consideración este efecto insertando un factor corrector k_{sh} al flujo de energía total que reduce la transferencia de calor como se encuentra en la ecuación (2.13), aunque esta aproximación no es del todo correcta ya que el factor debería solo aplicarse al flujo de energía por radiación y no por convección en la que no tiene importancia el efecto sombra ya que el gas rodea totalmente la sección.

$$\Delta\theta = k_{sh} \frac{A_s/V}{\rho c} Q_{net} \Delta t \quad (2.13)$$

En la expresión anterior Q_{net} es la transferencia de calor neta por convección y radiación juntas, y A_s/V representa el factor de forma (Área superficial expuesta/Volumen). El factor para el efecto de sombra en un perfil en doble T está definido como la razón entre el factor de forma de caja sin contar las cavidades $[A_s/V]_b$ y el factor de forma real (ver ecuación (2.14)).

$$k_{sh} = 0.9 [A_s/V]_b / [A_s/V] \quad (2.14)$$

Es importante además tener en cuenta que el flujo de calor por radiación que emite el perfil en sus caras interiores no solo se intercambia con el ambiente, sino que es reabsorbido por las caras adyacentes, similar a lo que ocurre con la radiación en el interior de un cuerpo negro (cavidad negra) como se muestra en la Figura 2.11 (a). La consecuencia resultante de este efecto es que una cantidad mayor de la energía recibida es absorbida, ya que la que debería perderse por emisión al ambiente es menor que si la geometría no tuviera cavidades. Tal y como se muestra en la Figura 2.11(b), donde casi toda la energía que entra en el cuerpo negro es absorbida totalmente pues poca de ella puede salir por el pequeño orificio.

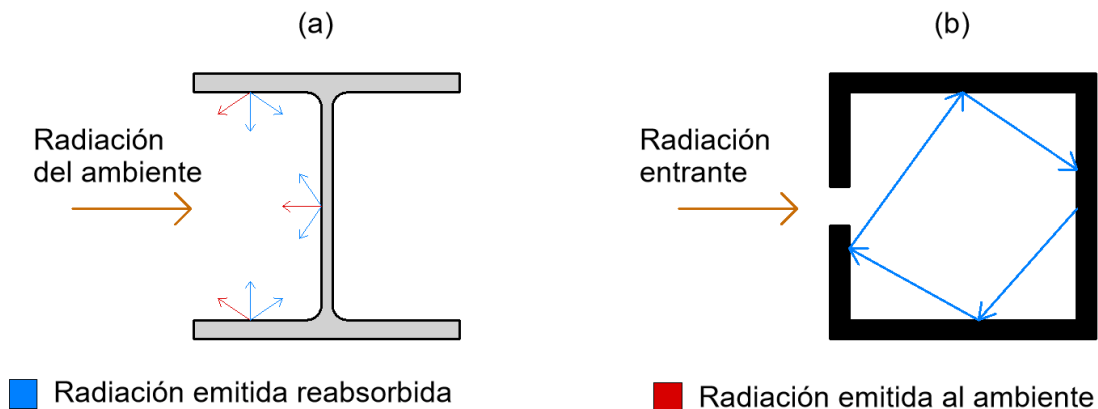


Figura 2.11 Efecto de reabsorción de la radiación por cavidad

Ya que la radiación reabsorbida se encuentra a la misma temperatura del elemento, haciendo el flujo de reabsorción nulo, pudiera este efecto ser considerado dentro del factor de efecto sombra, o como un factor adicional por radiación por cavidad.

2.7 Modelización de incendio

Existen varios tipos de incendio generalmente clasificados según el tipo de combustible que los genera; cuando se trata de un incendio en un espacio interior su desarrollo normalmente está condicionado por la disposición de oxígeno y del combustible, de manera que, si existe suficiente combustible para su propagación pero no mucho oxígeno, se dice de un incendio controlado por

ventilación, y si existe suficiente oxígeno, pero poco combustible es un incendio controlado por combustible. El incendio, en un espacio interior, está constituido por varias fases:

- Ignición: ocurre cuando el material combustible se calienta suficiente hasta prenderse fuego.
- Crecimiento: por medio de radiación y contacto se transmite calor a los combustibles cercanos, aumentando su temperatura.
- Combustión súbita generalizada: los gases calientes generados en la etapa anterior y las superficies combustibles, comienzan a arder de forma repentina; aunque no siempre se da esta etapa por la insuficiencia de oxígeno o una temperatura alcanzada por debajo de la temperatura de ignición de los gases.
- Pleno desarrollo: todos los materiales combustibles dentro del recinto están incendiados dependiendo ahora el fuego de la cantidad de oxígeno, pasando generalmente a estar controlado por ventilación y dependiente de las aberturas de ventilación del espacio.
- Decaimiento: el fuego empieza a consumir los materiales combustibles, reduciendo la energía liberada y pasando a ser controlado por combustible, disminuyendo la temperatura.

Estas etapas pueden representarse mediante una curva tiempo-temperatura que simula la acción del fuego en un espacio confinado. Para reproducir el fuego se hace uso de la curva nominal tiempo-temperatura de EN 1991-1-2 [3]. La curva que expresa la temperatura del gas (aire) dentro del espacio se obtiene de la siguiente formulación

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.15)$$

donde t es el tiempo medido en minutos. Para la transferencia de calor del ambiente a los elementos estructurales por convección se toma un valor del coeficiente de convección de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ [3].

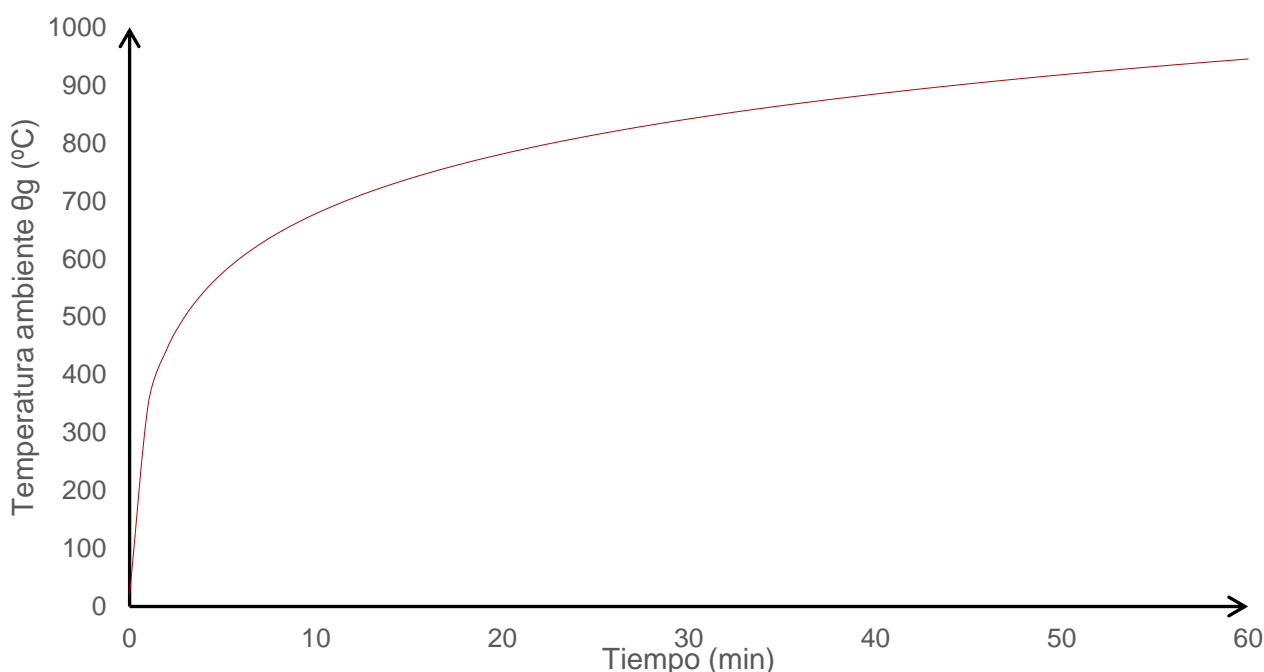


Figura 2.12 Curva nominal tiempo- temperatura (ISO 834)

En caso de tener datos más específicos de las condiciones del entorno, una forma más detallada de reproducir el fuego se hace por medio de la curva paramétrica tiempo-temperatura del Anejo A de EN 1991-1-2 [3] que se usa para espacios de una altura máxima de cuatro metros, sin aberturas

en el techo y un área máxima de 500m², datos que se cumplen generalmente en edificios residenciales e industriales. La curva que expresa la temperatura del gas dentro del espacio (aire en este caso) se obtiene de la siguiente formulación

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t\Gamma} - 0.204e^{-1.7t\Gamma} - 0.472e^{-19t\Gamma}) \quad \text{donde}$$

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 \left(\frac{1160}{0.04}\right)^2 \quad (2.16)$$

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad 0.02 \leq O \leq 0.20 \text{ m}^{1/2} \text{ factor de apertura}$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad 100 \leq b \leq 2200 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K} \text{ características del gas}$$

donde t es el tiempo medido en segundos, la relación A_v/A_t muestra el porcentaje del área de ventanas respecto al área total del espacio (muros, piso y techo), h_{eq} es la altura promedio de las aperturas en los muros y, " ρ ", " c " y " λ " son la densidad, calor específico y conductividad térmica del material que envuelve el recinto respectivamente y a temperatura 20°C. La temperatura máxima se alcanzará cuando el tiempo alcance el máximo de los siguientes valores $\max[0.2 \times 10^{-3} q_{t,d}/O; t_{lim}]$ (en horas) . En caso de crecimiento de fuego lento, $t_{lim} = 25 \text{ min}$, cuando se trata de fuego controlado por la combustión; el otro término es cuando es fuego controlado por ventilación. Este tiempo máximo está relacionado con las fases de un incendio confinado mencionadas para pasar a la etapa de decaimiento.

CAPÍTULO III. Comportamiento constitutivo del acero al carbono y acero inoxidable en situación de incendio

3.1 Acero al carbono

Se denomina acero al carbono al acero habitual utilizado en la construcción, diferente de los aceros empleados en otras industrias. Su constitución química es compleja, compuesto principalmente por hierro (Fe) y un porcentaje de carbono (C) de hasta un 2% (no obstante, generalmente no excede el 1%), aunque también se encuentran en pocas cantidades otros elementos como el manganeso (Mn), silicio (Si), azufre (S) y fósforo (P). Dependiendo del porcentaje de carbono que contengan estos aceros pueden dividirse en cuatro categorías [8]:

1. Bajos en carbono, con un porcentaje menor al 0.15%.
2. Acero dulce, esta entre el 0.15-0.29% (los aceros al carbono estructurales entran en esta categoría).
3. Acero al carbono medios con un porcentaje entre 0.30-0.59%.
4. Altos en carbono entre el 0.60-1.70%.

La influencia más importante del carbono en el acero se ve reflejada en su resistencia mecánica, aumentándola cuanto mayor sea el contenido de carbono, pero reduciendo su ductilidad [9]. Los perfiles estructurales de acero pueden tener diferentes formas en su sección transversal, desde perfiles con secciones abiertas doblemente simétricas, simétricas solo en un eje o secciones cerradas; además pueden cambiar sus propiedades según el tipo de procedimiento empleado para formar el producto.

3.1.1 Propiedades del acero al carbono

Tiene una densidad media de 7850 kg/m^3 y un coeficiente de dilatación lineal de $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C , un módulo de elasticidad con un valor convencional de $E=210000 \text{ N/mm}^2$, coeficiente de Poisson de $\nu=0.30$ y un módulo de elasticidad transversal $G=E/2(1+\nu)$ [2].

3.1.2 Comportamiento tensión- deformación EN 1993-1-2

La caracterización del comportamiento tensión-deformación del acero al carbono se realiza mediante un ensayo a tracción de probeta normalizada a temperatura ambiente. Se observa que el acero al carbono presenta una forma lineal hasta el límite elástico, a partir del cual se mantiene plana hasta antes de su endurecimiento por deformación. El punto donde termina la relación lineal entre la tensión y la deformación se llama límite de proporcionalidad y se presenta antes del límite elástico. Las propiedades de la gráfica tensión-deformación reducen su valor a medida que aumenta la temperatura, y toma la forma de la Figura 3.1. A temperaturas mayores a 400°C no se presenta el endurecimiento por deformación, por lo que el endurecimiento por deformación no se considera en un análisis en situación de incendio.

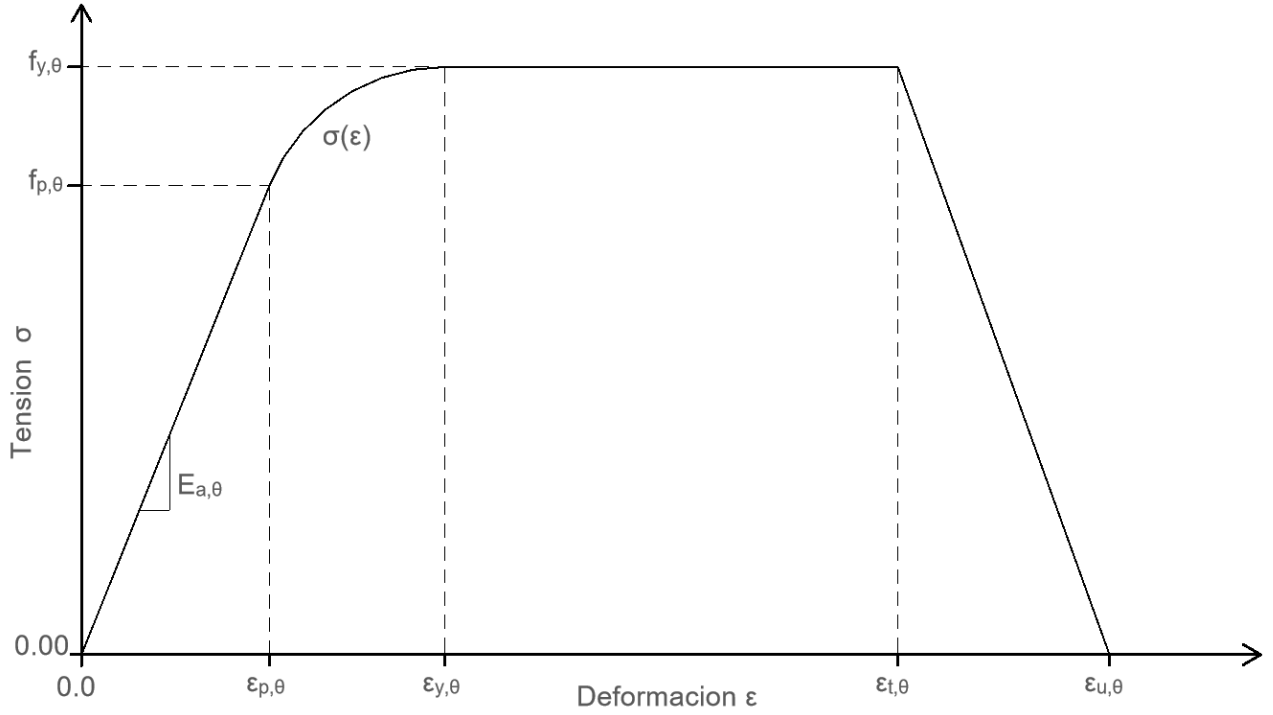


Figura 3.1 Diagrama tensión - deformación para aceros al carbono con la representación de las magnitudes más relevantes

Las siguientes expresiones constitutivas de EN 1993-1-2 [4] muestran cómo obtener la gráfica anterior de la tensión en función de la deformación para diferentes temperaturas:

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \varepsilon E_{a,\theta} & \varepsilon &\leq \varepsilon_{p,\theta} \\
 \sigma &= f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2} & \varepsilon_{p,\theta} &< \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta} \\
 \sigma &= f_{y,\theta} & \varepsilon_{y,\theta} &\leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta} \\
 \sigma &= f_{y,\theta} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})} \right] & \varepsilon_{t,\theta} &< \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Las constantes a , b y c se obtienen:

$$\begin{aligned}
 a^2 &= \frac{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})}{\left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)} \\
 b^2 &= c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2 \\
 c &= \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Donde los valores de parámetros usados son $\varepsilon_{y,\theta} = 0.02$, $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15$, $\varepsilon_{u,\theta} = 0.20$ y $\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{a,\theta}}$. Los valores nominales del límite elástico y la resistencia última de algunos aceros empleados en construcción se recogen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores nominales de f_y y f_u a 20°C para aceros estructurales laminados en caliente [2]

Grado del acero al carbono	Espesor nominal del elemento t			
	t ≤ 40mm		40mm < t ≤ 80mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	490	355	470
S450	440	550	410	550

La Tabla 3.2 muestra los valores para los coeficientes de reducción del límite de proporcionalidad f_p , la tensión f_y y el módulo E para diferentes temperaturas; mientras las propiedades descritas en el capítulo 2.6 se recogen en el ANEJO A.

Tabla 3.2 Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a elevadas temperaturas [4]

Temperatura θ [°C]	Factor de reducción $k_{p,\theta}$	Factor de reducción $k_{y,\theta}$	Factor de reducción $k_{E,\theta}$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	0.807	1.000	0.900
300	0.613	1.000	0.800
400	0.420	1.000	0.700
500	0.360	0.780	0.600
600	0.180	0.470	0.310
700	0.075	0.230	0.130
800	0.050	0.110	0.090
900	0.0375	0.060	0.0675
1000	0.0250	0.040	0.0450
1100	0.0125	0.020	0.0225

Nota: para valores de temperaturas intermedios se puede usar una interpolación lineal

Como alternativa a la Tabla 3.2 puede recurrirse a la Figura 3.2 para visualizar el decaimiento de las propiedades del acero al carbono a elevadas temperaturas.

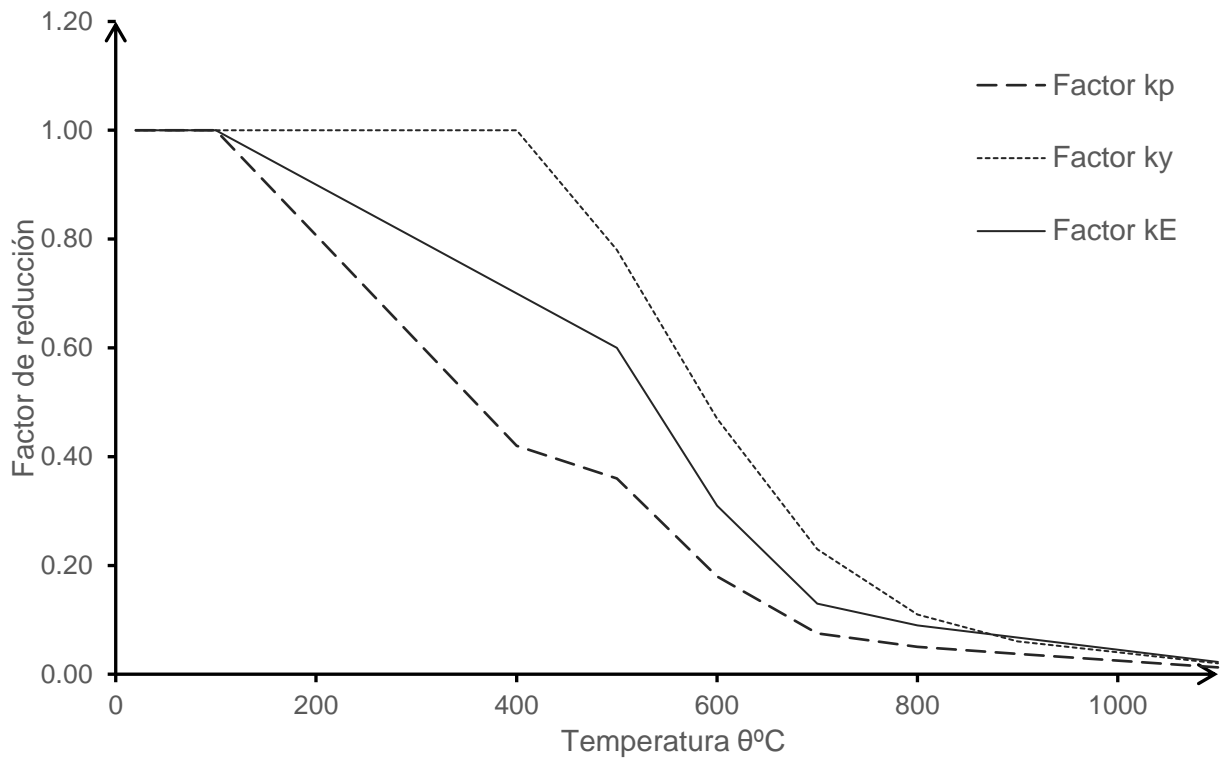


Figura 3.2 Factores de reducción de las propiedades del acero al carbono a diferentes temperaturas

Con las expresiones de (3.1) y los valores de la Tabla 3.2 se puede graficar el diagrama tensión-deformación de cualquier grado de acero para todas las temperaturas. La Figura 3.3 muestra las curvas tensión-deformación a distintas temperaturas del acero S275, a modo de ejemplo.

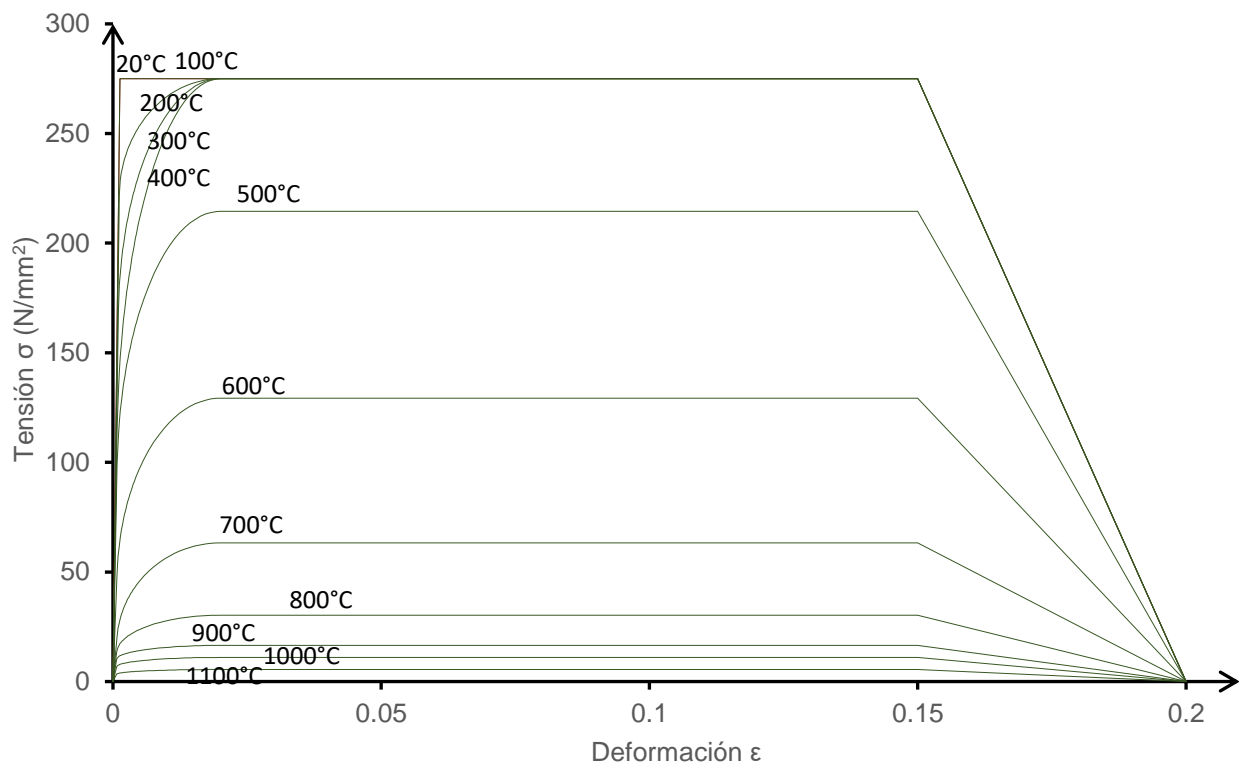


Figura 3.3 Diagrama tensión - deformación del acero S275 a diferentes temperaturas

3.1.3 Comprobación de estados límite últimos en situación de incendio

La resistencia última a compresión de un pilar está condicionada por el pandeo por flexión de la pieza (apartado 2.4). A continuación, se presenta la verificación del pilar ante este fenómeno de inestabilidad en situación de incendio según EN 1993-1-2 [4].

3.1.3.1 Clasificación de secciones transversales

Para el cálculo de ε_θ se usa una simplificación, clasificando la sección como se hace a temperatura ambiente según EN 1993-1-2 [4] (ver Tabla 1.2), pero con un factor reductor que considera los efectos de la temperatura aplicado a la ecuación (1.4) como se expresa en la formulación (3.3).

$$\varepsilon_\theta = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.3)$$

3.1.3.2 Resistencia a compresión

La resistencia de los elementos comprimidos está condicionada por el pandeo por flexión y puede calcularse como sigue [4]:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (\text{para elementos no esbeltos}) \quad (3.4)$$

El valor de χ_{fi} se tomará como el menor entre $\chi_{y,fi}$ y $\chi_{z,fi}$, calculado según (3.5).

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \leq 1 \quad (3.5)$$

Para la expresión anterior es necesario obtener ϕ_θ y $\bar{\lambda}_\theta$, que se muestran en (3.6) y (3.8) respectivamente; ha de notarse que para ϕ_θ no existe ninguna zona plana inicial ya que ante la acción del fuego la resistencia a pandeo disminuye para todas las esbelteces.

$$\phi_\theta = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] \quad (3.6)$$

El coeficiente de imperfección α en situación de incendio depende solo del límite elástico como sigue

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.7)$$

En el caso de la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_\theta$ se calcula su valor considerando los factores de reducción del límite elástico y el módulo de elasticidad implícito en el cálculo de N_{cr} , como se describe en la ecuación (2.3).

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right) \quad (\text{para elementos no esbeltos}) \quad (3.8)$$

En caso de tener elementos muy esbeltos en los que deba considerarse los efectos de la abolladura local es necesario utilizar el área efectiva A_{eff} en las ecuaciones (3.4) y (3.8).

3.2 Acero inoxidable

Los aceros inoxidables son un grupo de aleaciones que tienen una resistencia alta a la corrosión, su constitución química es base de hierro (Fe), un máximo de Carbono (C) del 1.2%, y un mínimo de Cromo (Cr) del 10.5% que en presencia de oxígeno genera una capa transparente que protege el material ante la acción corrosiva del ambiente; naturalmente, esta propiedad dependerá de la corrosividad del entorno, el tratamiento superficial y la composición del acero [10]. Además, con el objetivo de mejorar propiedades como la ductilidad y la resistencia al impacto, se suelen agregar otros compuestos como el molibdeno (Mo), niobio (Nb) o titanio (Ti) [11].

3.2.1 Tipos de acero inoxidable

Existen cinco conjuntos básicos de acero inoxidable clasificados según su estructura metalúrgica:

1. Ferríticos
2. Austeníticos
3. Dúplex
4. Martensíticos
5. Endurecimiento por precipitación

No todos son aptos para ser utilizados como material estructural, especialmente por temas de soldabilidad; los tres primeros son los más empleados en aplicaciones estructurales. Para designar estos aceros se usa la nomenclatura de EN 10088 que emplea la numeración europea, donde el primero dígito corresponde al tipo de material que en este caso “1.” es para acero, los siguientes dos dígitos indican el tipo de acero inoxidable y los últimos dos son una identificación individual:

- 1.40XX contiene Ni <2.5% sin molibdeno, niobio y titanio
- 1.41XX contiene Ni <2.5% y molibdeno, sin niobio y titanio
- 1.43XX contiene Ni \geq 2.5% sin molibdeno, niobio y titanio
- 1.44XX contiene Ni \geq 2.5% y molibdeno, sin niobio y titanio
- 1.45XX contiene adiciones especiales
- 1.46XX contiene Ni y son resistentes a temperaturas elevadas y a productos químicos [10].

El grado de soldabilidad de cada acero inoxidable depende de la microestructura interna que lo compone. Para predecir de que tipo será la microestructura de un acero inoxidable, Strauss y Maurer introdujeron el diagrama de Níquel-Cromo; posteriormente Schaeffler obtuvo de manera empírica el diagrama que se usa actualmente para predecir la microestructura de los aceros inoxidables, utilizando las expresiones de Níquel-Cromo equivalente que relaciona los componentes de la aleación [12] (ver Figura 3.4).

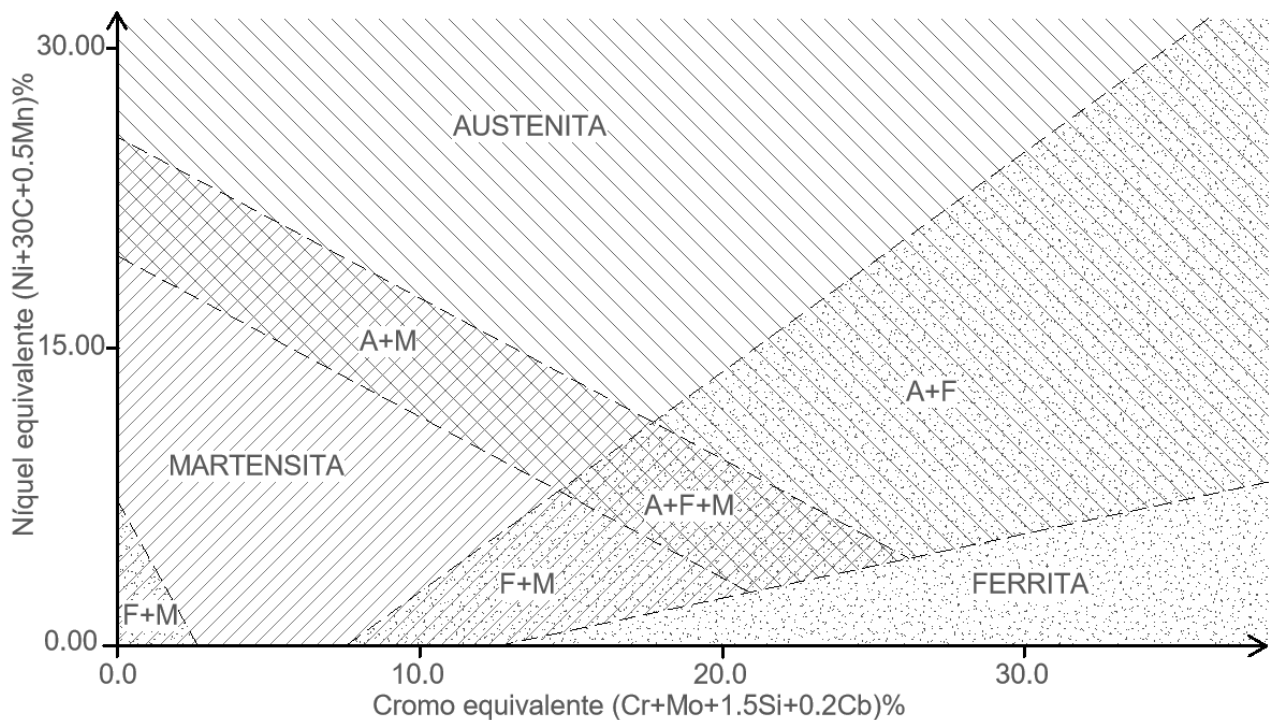


Figura 3.4 Diagrama de Schaeffler [12]

3.2.1.1 Ferríticos

Obtienen su nombre por su estructura formada básicamente de ferrita (blanda y dúctil) con una estructura atómica centrada en el cubo al igual que el acero al carbono [10]. No se aumenta su resistencia utilizando tratamientos térmicos, pero sí mediante el trabajado en frío.

3.2.1.2 Austeníticos

Son llamados así por su estructura compuesta básicamente por austenita que se forma al añadir níquel en suficiente cantidad; son los aceros con la mejor resistencia a temperaturas elevadas de los aceros inoxidables. Tienen una estructura atómica cristalina cúbica centrada en las caras que los hace tener una alta resistencia a la tensión, al impacto y una elevada ductilidad [10]. No se puede aumentar su resistencia por medio de tratamientos térmicos, pero sí mediante trabajado en frío. Por las características anteriores son los aceros inoxidables más utilizados en la construcción.

3.2.1.3 Dúplex

Son un intermedio entre los austeníticos y ferríticos, de manera que los dúplex son conocidos también como aceros inoxidables austenítico-ferrítico. Su resistencia es mayor que la de los aceros austeníticos, por lo que se pueden emplear secciones transversales de menor tamaño; al igual que los ferríticos y austeníticos, no pueden mejorar su resistencia por tratamientos térmicos y sí por trabajado en frío [10].

3.2.1.4 Martensíticos

Su estructura está centrada en el cuerpo y está compuesta básicamente de martensita. Son menos dúctiles que los ferríticos, dúplex y austeníticos, y a diferencia de éstos sí puede mejorar su resistencia mediante tratamientos térmicos gracias a su elevado contenido de carbono [10].

3.2.1.5 Endurecimiento por precipitación

Pueden adquirir tres diferentes microestructuras en función del grado que tengan: austenítico, semi-austenítico o martensítico; su resistencia puede mejorarse considerablemente por tratamiento térmico [10].

3.2.2 Propiedades de los aceros inoxidables

El módulo de elasticidad tiene un valor de $E=200000 \text{ N/mm}^2$ en todos los aceros inoxidables como se recomienda en el manual de diseño para acero inoxidable estructural [10], se mantiene un coeficiente de Poisson de $\nu=0.30$ y un módulo de elasticidad transversal $G=E/2(1+\nu)$ [1]; otras propiedades se recogen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Propiedades físicas a temperatura ambiente de aceros inoxidables [10]

Grupo	Grado	Densidad (kg/m ³)	Coeficiente de dilatación térmica 20-100°C (10 ⁻⁶ /°C)	Conductividad térmica (W/m°C)	Capacidad calorífica (J/kg °C)
Austenítico	1.4301	7900	16	15	500
	1.4404	8000	16	15	500
	1.4541	7900	16	15	500
	1.4571	8000	16,5	15	500
Dúplex	1.4062	7800	13	15	480
	1.4482	7800	13	15	500
	1.4462	7800	13	15	500
	1.4662	7700	13	15	500
Ferrítico	1.4003	7700	10,4	25	430
	1.4521	7700	10,4	23	430
	1.4621	7700	10	21	460

Las variaciones en propiedades físicas como la dilatación térmica, debe tenerse muy en cuenta cuando se quiere utilizar aceros diferentes, ya que por ejemplo entre el acero al carbono y los austeníticos hay una diferencia de alrededor del 30% y puede generar tensiones no deseadas ante efectos térmicos.

3.2.3 Comportamiento tensión-deformación

Aunque existen varias similitudes entre el acero inoxidable y el acero al carbono ordinario, existe suficiente diversidad en sus propiedades físicas para demandar un tratamiento separado en el diseño estructural. La forma en que se comporta el acero inoxidable difiere de la conducta tensión-deformación del acero al carbono en varios aspectos, aunque la más importante es el diagrama

tensión-deformación. El acero inoxidable presenta una forma curva y no muestra un límite elástico bien definido (ver Figura 3.5), por lo que este último se define convencionalmente como aquella tensión que genera una deformación remanente del 0.2% ($f_{p0.2}$). Aunque la tensión $f_{p0.2}$ es análoga al límite elástico a 20°C, EN 1993-1-2 [4] permite encontrar $f_{y,\theta}$ mediante un factor corrector $k_{2\%,\theta}$ para una deformación total del 2% y definida como:

$$f_{2,\theta} = f_{y,\theta} = f_{p0.2,\theta} + k_{2\%,\theta}(f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}) \quad (3.9)$$

Se ha observado que existen diferencias en el comportamiento a tracción y compresión del acero inoxidable (no simetría), además de un comportamiento diferente según la dirección de la carga (anisotropía).

3.2.4 Verificación según normativa EN 1993-1-2 (2005)

El comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable descrito en el apartado 3.2.3 se desarrolla gráficamente en la Figura 3.5.

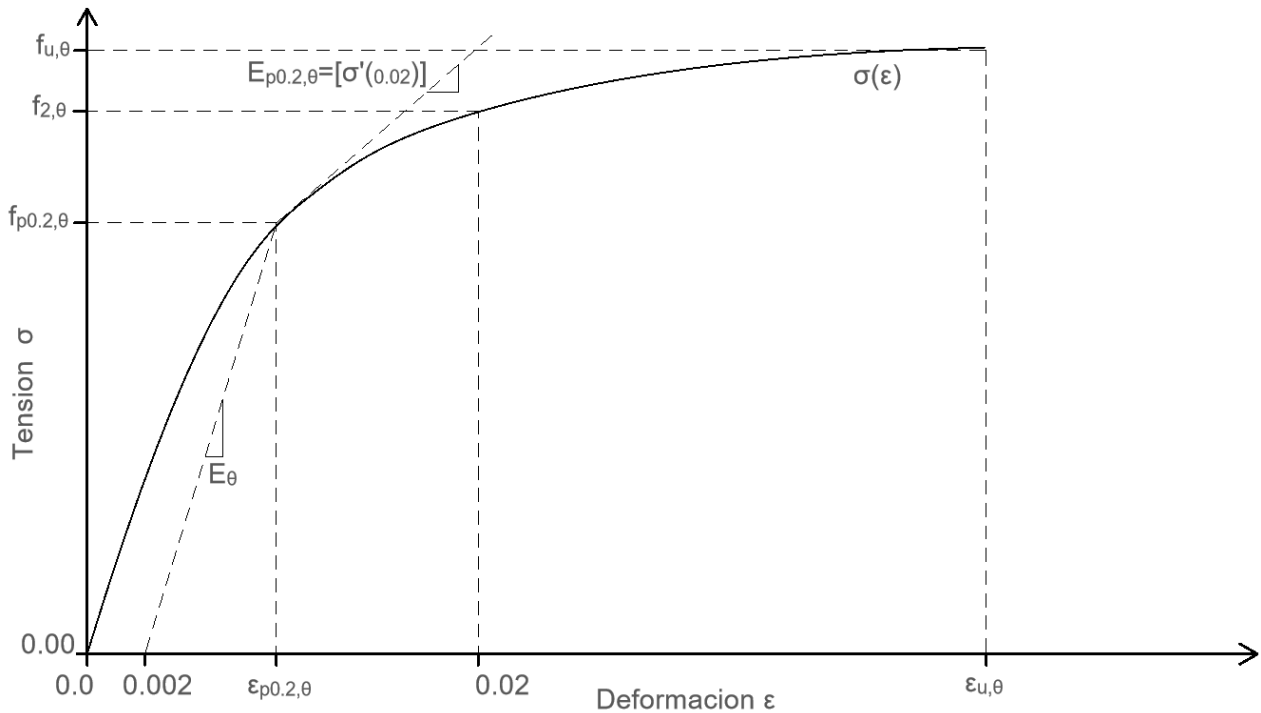


Figura 3.5 Diagrama tensión - deformación para aceros inoxidables con la representación de las magnitudes más relevantes

Las siguientes expresiones constitutivas en EN 1993-1-2 [4] muestran cómo obtener la gráfica anterior de la tensión en función de la deformación para diferentes temperaturas:

$$\sigma = \frac{E_{\theta} \cdot \varepsilon}{1 + a \cdot \varepsilon^b} \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{p0.2,\theta} \quad (3.10)$$

$$\sigma = f_{p0.2,\theta} - e + \left(\frac{d}{c}\right) \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2} \quad \varepsilon_{p0.2,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$$

Se usa para $\varepsilon_{p0.2,\theta}$ la definida en ecuación (3.13). Las constantes de la expresión (3.10) se describen en la (3.11).

$$a = \frac{E_{\theta}\varepsilon_{p0.2,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{f_{p0.2,\theta}(\varepsilon_{p0.2,\theta})^b}$$

$$b = \frac{(1 - \varepsilon_{p0.2,\theta}E_{p0.2,\theta}/f_{p0.2,\theta})E_{\theta}\varepsilon_{p0.2,\theta}}{(E_{\theta}\varepsilon_{p0.2,\theta}/f_{p0.2,\theta} - 1)f_{p0.2,\theta}}$$

$$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta})\left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} + \frac{e}{E_{p0.2,\theta}}\right) \quad (3.11)$$

$$d^2 = e(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta})E_{p0.2,\theta} + e^2$$

$$e = \frac{(f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta})E_{p0.2,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta})}$$

Los valores nominales de la tensión de los aceros inoxidables a temperatura ambiente se recogen de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia última f_u para aceros inoxidables estructurales según EN10088 [10]

		Forma de producto							
Tipo de acero inoxidable	Grado	Fleje Laminado en frio		Fleje Laminado en caliente		Placa Laminada en caliente		Barras, varillas y secciones	
		Espesor nominal t							
		t≤8mm		t≤13.5mm		t≤75mm		t≤250mm	
		f _y	f _u	f _y	f _u	f _y	f _u	f _y	f _u
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Austenítico	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	500
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
Dúplex	1.4062	530 ¹	700 ¹	480 ²	680 ²	450	650	380 ³	650 ³
	1.4162	530 ¹	700 ¹	480 ²	680 ²	450	650	450 ³	650 ³
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 ³	600 ³
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 ³	650 ³
	1.4482	500 ¹	700 ¹	480 ²	660 ²	450	650	400 ³	650 ³

	1.4662	550 ¹	750 ¹	550 ⁴	750 ⁴	480	680	450 ³	650 ³
Ferrítico	1.4003	280	450	280	450	250 ⁵	450 ⁵	260 ⁶	450 ⁶
	1.4016	260	450	240	450	240 ⁵	430 ⁵	240 ⁶	400 ⁶
	1.4509	230	430	-	-	-	-	200 ⁷	420 ³
	1.4521	300	420	280	400	280 ⁸	420 ⁸	-	-
	1.4621	230 ⁵	400 ⁹	230 ⁸	400 ⁸	-	-	240 ⁷	420 ⁷
Los valores nominales de f_y y f_u dados en esta tabla pueden ser usados en el diseño sin tener en cuenta los efectos de la anisotropía o del endurecimiento por deformación.									
	¹ $t \leq 6.4\text{mm}$		⁴ $t \leq 13\text{mm}$		⁷ $t \text{ o } \phi \leq 50\text{mm}$				
	² $t \leq 10\text{mm}$		⁵ $t \leq 25\text{mm}$		⁸ $t \leq 12\text{mm}$				
	³ $t \text{ o } \phi \leq 160\text{mm}$		⁶ $t \text{ o } \phi \leq 100\text{mm}$		⁹ $t \leq 6\text{mm}$				

Al igual que el acero al carbono las propiedades de la gráfica tensión-deformación de la Figura 3.5 van reduciendo su valor a medida aumenta la temperatura y en la Tabla 3.5 se muestran los valores para los coeficientes de reducción de la tensión $f_{p0.2,\theta}$, $f_{2,\theta}$, $f_{u,\theta}$ y el módulo E_θ para diferentes temperaturas.

Tabla 3.5 Factores de reducción para la tensión y rigidez de aceros inoxidable a elevadas temperaturas [4]

Temperatura θ [°C]	Factor de reducción $k_{E,\theta}$	Factor de reducción $k_{p0.2,\theta}$	Factor de reducción $k_{u,\theta}$	Factor de reducción $k_{2\%,\theta}$
Austenítico I				
1.4301				
20	1.00	1.00	1.00	0.26
100	0.96	0.82	0.87	0.24
200	0.92	0.68	0.77	0.19
300	0.88	0.64	0.73	0.19
400	0.84	0.60	0.72	0.19
500	0.80	0.54	0.67	0.19
600	0.76	0.49	0.58	0.22
700	0.71	0.40	0.43	0.26
800	0.63	0.27	0.27	0.35
900	0.45	0.14	0.15	0.38
1000	0.20	0.06	0.07	0.40
1100	0.10	0.03	0.03	0.40
1200	0.00	0.00	0.00	0.40
Austenítico II				
1.4401, 1.4404				
20	1.00	1.00	1.00	0.24
100	0.96	0.88	0.93	0.24
200	0.92	0.76	0.87	0.24
300	0.88	0.71	0.84	0.24
400	0.84	0.66	0.83	0.21
500	0.80	0.63	0.79	0.20
600	0.76	0.61	0.72	0.19
700	0.71	0.51	0.55	0.24
800	0.63	0.40	0.34	0.35
900	0.45	0.19	0.18	0.38

1000	0.20	0.10	0.09	0.40
1100	0.10	0.05	0.04	0.40
1200	0.00	0.00	0.00	0.40
Austenítico III				
1.4571				
20	1.00	1.00	1.00	0.25
100	0.96	0.89	0.88	0.25
200	0.92	0.83	0.81	0.25
300	0.88	0.77	0.80	0.24
400	0.84	0.72	0.80	0.22
500	0.80	0.69	0.77	0.21
600	0.76	0.66	0.71	0.21
700	0.71	0.59	0.57	0.25
800	0.63	0.50	0.38	0.35
900	0.45	0.28	0.22	0.38
1000	0.20	0.15	0.11	0.40
1100	0.10	0.08	0.06	0.40
1200	0.00	0.00	0.00	0.40
Dúplex II				
1.4462				
20	1.00	1.00	1.00	0.37
100	0.96	1.00	0.94	0.37
200	0.92	1.00	0.88	0.37
300	0.88	0.98	0.86	0.37
400	0.84	0.91	0.83	0.42
500	0.80	0.80	0.81	0.40
600	0.76	0.45	0.42	0.45
700	0.71	0.19	0.21	0.46
800	0.63	0.13	0.12	0.47
900	0.45	0.10	0.11	0.47
1000	0.20	0.07	0.09	0.47
1100	0.10	0.04	0.05	0.47
1200	0.00	0.00	0.00	0.47
Ferrítico II				
1.4003,				
20	1.00	1.00	1.00	0.35
100	0.96	0.91	0.93	0.35
200	0.92	0.80	0.85	0.32
300	0.88	0.75	0.83	0.30
400	0.84	0.72	0.82	0.28
500	0.80	0.65	0.71	0.30
600	0.76	0.56	0.57	0.33
700	0.71	0.37	0.38	0.40
800	0.63	0.26	0.29	0.41
900	0.45	0.10	0.12	0.45
1000	0.20	0.03	0.04	0.47
1100	0.10	0.02	0.02	0.47
1200	0.00	0.00	0.00	0.47

El valor de E por el cual se multiplica el $k_{E,\theta}$ de la Tabla 3.5 para encontrar E_θ , es diferente según el tipo de acero inoxidable en EN 1993-1-4, para austeníticos y dúplex se toma 200000 N/mm^2 y para ferríticos 220000 N/mm^2 [1], $k_{2\%,\theta}$ es el factor de reducción de la tensión para una deformación total del 2% a una temperatura θ con respecto al límite elástico a 20°C , pero no definido como una proporción de f_y sino como está especificado en la fórmula (3.9). El factor reductor de la tangente en el límite elástico y la deformación última a elevadas temperaturas se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Factores de reducción para el módulo tangente en el límite elástico y la deformación última de aceros inoxidables a elevadas temperaturas [4]

Temperatura θ [$^\circ\text{C}$]	Factor de reducción $k_{Ect,\theta}$	Deformación última $\varepsilon_{u,\theta}$
Austenítico I		
1.4301		
20	0.11	0.40
100	0.05	0.40
200	0.02	0.40
300	0.02	0.40
400	0.02	0.40
500	0.02	0.40
600	0.02	0.35
700	0.02	0.30
800	0.02	0.20
900	0.02	0.20
1000	0.02	0.20
1100	0.02	0.20
1200	0.02	0.20
Austenítico II		
1.4401, 1.4404		
20	0.050	0.40
100	0.049	0.40
200	0.047	0.40
300	0.045	0.40
400	0.030	0.40
500	0.025	0.40
600	0.020	0.40
700	0.020	0.30
800	0.020	0.20
900	0.020	0.20
1000	0.020	0.20
1100	0.020	0.20
1200	0.020	0.20
Austenítico III		
1.4571		
20	0.060	0.40
100	0.060	0.40
200	0.050	0.40
300	0.040	0.40
400	0.030	0.40
500	0.025	0.40
600	0.020	0.35
700	0.020	0.30
800	0.020	0.20

900	0.020	0.20
1000	0.020	0.20
1100	0.020	0.20
1200	0.020	0.20
Dúplex II		
1.4462		
20	0.055	0.20
100	0.030	0.20
200	0.030	0.20
300	0.030	0.20
400	0.030	0.15
500	0.030	0.15
600	0.030	0.15
700	0.030	0.15
800	0.030	0.15
900	0.030	0.15
1000	0.030	0.15
1100	0.030	0.15
1200	0.030	0.15
Ferrítico II		
1.4003,		
20	0.100	0.20
100	0.070	0.20
200	0.037	0.20
300	0.035	0.20
400	0.033	0.20
500	0.030	0.20
600	0.030	0.20
700	0.025	0.15
800	0.025	0.15
900	0.025	0.15
1000	0.025	0.15
1100	0.025	0.15
1200	0.025	0.15

Conociendo todos los datos necesarios pueden obtenerse las curvas tensión-deformación a diferentes temperaturas para aceros inoxidables. Tomando como ejemplo los grados 1.4301 y 1.4003, se pueden obtener las gráficas de la Figura 3.6 y Figura 3.7 respectivamente.

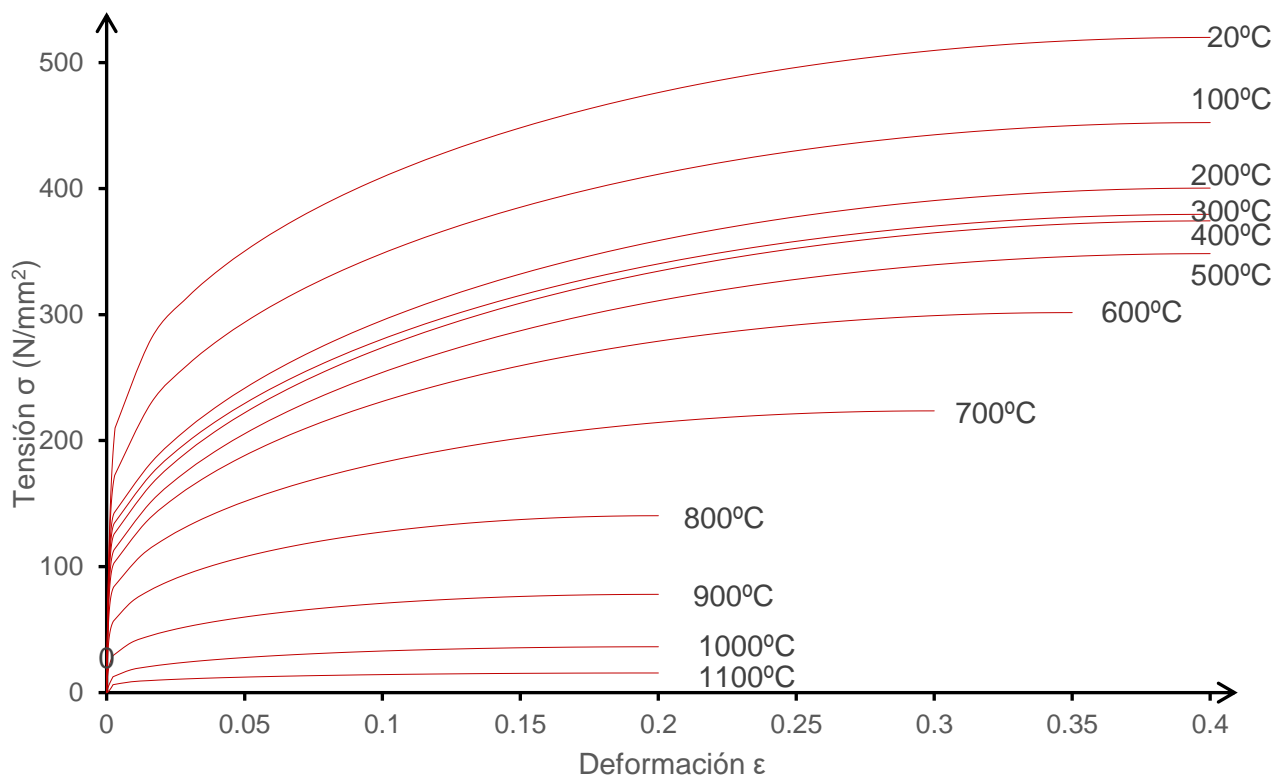


Figura 3.6 Diagrama tensión-deformación para Austenítico-I (1.4301) a diferentes temperaturas

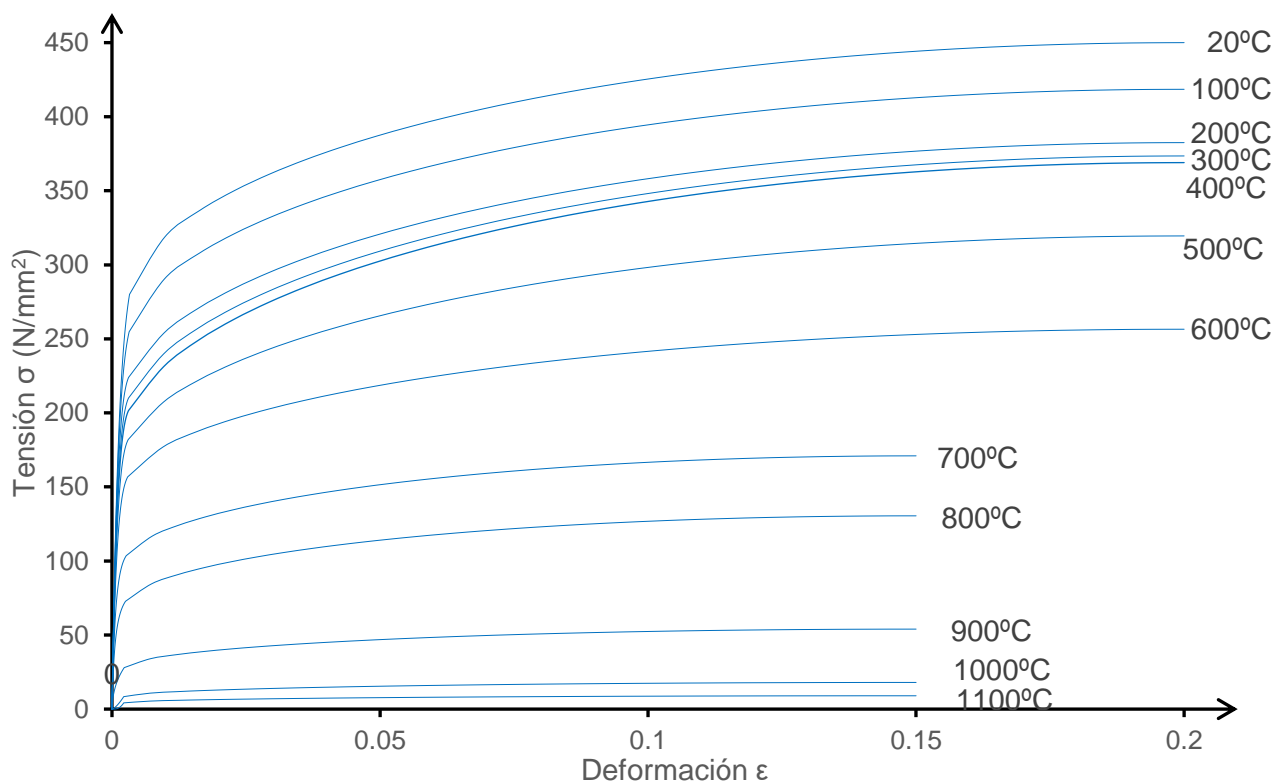


Figura 3.7 Diagrama tensión-deformación para Ferrítico II (1.4003) a diferentes temperaturas

3.2.4.1 Comprobación de estados límite últimos en situación de incendio

Se utiliza el mismo método presentado en el apartado 3.1.3 para acero al carbono ya que para elevadas temperaturas no existe normativa propia para aceros inoxidables, solo para temperatura ambiente.

En la clasificación de secciones transversales para el cálculo de ε_0 se usa la misma formulación del apartado 3.1.3.1 pero los rangos de la esbeltez c/t de los paneles comprimidos para clasificar la sección son los definidos en EN 1993-1-4 [1] (ver Tabla 1.2).

Para la resistencia a compresión, se realiza la comprobación mediante el procedimiento especificado en el apartado 3.1.3.2 pero con el $f_{y,\theta}$ definido en la ecuación (3.9).

3.2.5 Verificación según propuesta del Anejo C EN 1993-1-2 (En revisión)

El diagrama tensión-deformación según la normativa propuesta (Figura 3.8) se muestra en función de la tensión, a diferencia de la norma vigente que es en función de la deformación, y se basa principalmente en la formulación de Ramberg-Osgood [13] para describir la relación constitutiva (ver ANEJO B). A continuación, se expone las diferencias más significativas.

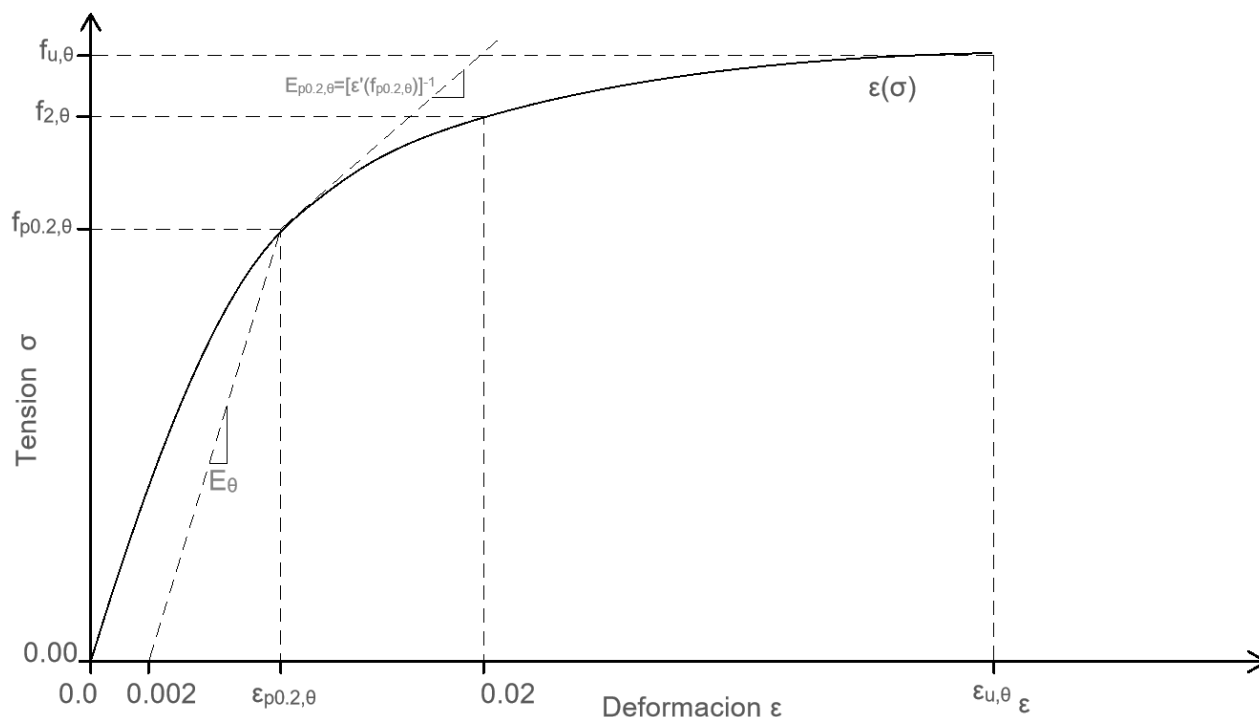


Figura 3.8 Diagrama tensión - deformación para aceros inoxidables con la representación de las magnitudes más relevantes

Las siguientes expresiones constitutivas [14] muestran cómo obtener la gráfica anterior de la deformación en función de la tensión:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0.002 \left[\frac{\sigma}{\sigma_{p0.2,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \sigma \leq \sigma_{p0.2,\theta} \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}} + \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}} \right) \left(\frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}} \right)^{m_\theta} + \varepsilon_{p0.2,\theta} \quad f_{p0.2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta}$$

Evaluando la ecuación (3.12) en $f_{p0.2,\theta}$

$$\varepsilon_{p0.2,\theta} = \frac{f_{p0.2,\theta}}{E_\theta} + 0.002 \quad (3.13)$$

La deformación última depende del tipo de acero empleado:

$$\varepsilon_{u,\theta} = 1 - \frac{f_{2,\theta}}{f_{u,\theta}} \quad \text{para aceros inoxidables austeníticos y dúplex} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{u,\theta} = 0.6 \left[1 - \frac{f_{2,\theta}}{f_{u,\theta}} \right] \quad \text{para aceros inoxidables ferríticos}$$

Para n_θ se pueden tomar los valores a temperatura ambiente n :

$n = 7$ para aceros inoxidables austeníticos

$n = 8$ para aceros inoxidables dúplex

$n = 14$ para aceros inoxidables ferríticos

El coeficiente m_θ se calcula tal como se indica en (3.15).

$$m_\theta = \frac{\ln \left(\frac{0.02 - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \frac{f_{2,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}}} \right)}{\ln \left(\frac{f_{2,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}} \right)} \quad \begin{array}{l} \text{para todos los grados de acero inoxidable} \\ 1.5 \leq m_\theta \leq 5 \end{array} \quad (3.15)$$

Los valores nominales de la tensión de los aceros inoxidables a temperatura ambiente son los mismos de la Tabla 3.4. Las propiedades de la gráfica tensión-deformación de la Figura 3.8 van reduciendo su valor a medida que aumenta la temperatura y en la Tabla 3.7 se muestran los valores para los coeficientes de reducción de la tensión $f_{p0.2,\theta}$, $f_{2,\theta}$, $f_{u,\theta}$ y el módulo E_θ para diferentes temperaturas. Es importante señalar que estos valores varían de forma diferente a los mostrados en la Tabla 3.5 de la norma vigente.

Tabla 3.7 Factores de reducción para la tensión y rigidez de aceros inoxidables a elevadas temperaturas [14]

Temperatura θ [°C]	Factor de reducción $k_{p0.2,\theta}$	Factor de reducción $k_{2,\theta}$	Factor de reducción $k_{u,\theta}$	Factor de reducción $k_{E,\theta}$
Austenítico I				
1.4301, 1.4307, 1.4318				
20	1.00	1.31	1.00	1.00
100	0.78	1.02	0.81	0.96
200	0.65	0.88	0.72	0.92
300	0.60	0.82	0.68	0.88
400	0.55	0.78	0.66	0.84
500	0.50	0.73	0.61	0.80
600	0.46	0.68	0.54	0.76
700	0.38	0.54	0.40	0.71
800	0.25	0.35	0.25	0.63
900	0.15	0.18	0.13	0.45
1000	0.07	0.08	0.08	0.20
1100	0.05	0.06	0.05	0.10
Austenítico II				
1.4401, 1.4404, 1.4541				
20	1.00	1.19	1.00	1.00
100	0.86	1.13	0.87	0.96
200	0.72	0.98	0.80	0.92
300	0.67	0.92	0.78	0.88
400	0.62	0.85	0.77	0.84
500	0.60	0.82	0.74	0.80
600	0.56	0.75	0.67	0.76
700	0.50	0.68	0.51	0.71
800	0.41	0.50	0.34	0.63
900	0.22	0.26	0.19	0.45
1000	0.14		0.10	0.20
1100	0.07		0.07	0.10
Austenítico III				
1.4571				
20	1.00	1.31	1.00	1.00
100	0.89	1.16	0.88	0.96
200	0.82	1.07	0.81	0.92
300	0.77	1.01	0.79	0.88
400	0.72	0.95	0.79	0.84
500	0.69	0.91	0.77	0.80
600	0.65	0.85	0.71	0.76
700	0.59	0.76	0.57	0.71
800	0.51	0.63	0.38	0.63
900	0.29	0.38	0.23	0.45
1000	0.15	0.18	0.10	0.20
Dúplex I				
1.4362, 1.4062, 1.4482				
20	1.00	1.15	1.00	1.00
100	0.83	0.94	0.94	0.96
200	0.75	0.82	0.87	0.92

300	0.69	0.77	0.79	0.88
400	0.58	0.70	0.70	0.84
500	0.43	0.59	0.59	0.80
600	0.27	0.45	0.47	0.76
700	0.14	0.28	0.33	0.71
800	0.07	0.14	0.20	0.63
900	0.04	0.05	0.09	0.45
Dúplex II				
1.4462, 1.4162, 1.4662				
20	1.00	1.12	1.00	1.00
100	0.82	0.96	0.96	0.96
200	0.70	0.86	0.91	0.92
300	0.65	0.82	0.88	0.88
400	0.60	0.76	0.82	0.84
500	0.53	0.67	0.71	0.80
600	0.42	0.55	0.56	0.76
700	0.27	0.37	0.38	0.71
800	0.15	0.21	0.22	0.63
900	0.07	0.11	0.14	0.45
1000	0.01	0.03	0.06	0.20
Ferrítico I				
1.4509, 1.4521, 1.4621				
20	1.00	1.12	1.00	1.00
100	0.88	1.01	0.93	0.98
200	0.83	0.99	0.91	0.95
300	0.78	0.92	0.88	0.92
400	0.73	0.90	0.82	0.86
500	0.66	0.86	0.78	0.81
600	0.53	0.71	0.64	0.75
700	0.39	0.48	0.41	0.54
800	0.10	0.13	0.11	0.33
900	0.04	0.04	0.03	0.21
1000	0.02	0.02	0.01	0.09
Ferrítico II				
1.4003, 1.4016				
20	1.00	1.19	1.00	1.00
100	0.93	1.12	0.93	0.98
200	0.91	1.09	0.89	0.95
300	0.89	1.07	0.87	0.92
400	0.87	1.05	0.84	0.86
500	0.75	1.01	0.82	0.81
600	0.43	0.48	0.33	0.75
700	0.16	0.18	0.13	0.54
800	0.10	0.12	0.09	0.33
900	0.06	0.09	0.07	0.21
1000	0.04	0.06	0.05	0.09

Como alternativa a la Tabla 3.7 puede recurrirse a la Figura 3.9 y Figura 3.10 para comprender mejor el comportamiento del acero inoxidable a elevadas temperaturas.

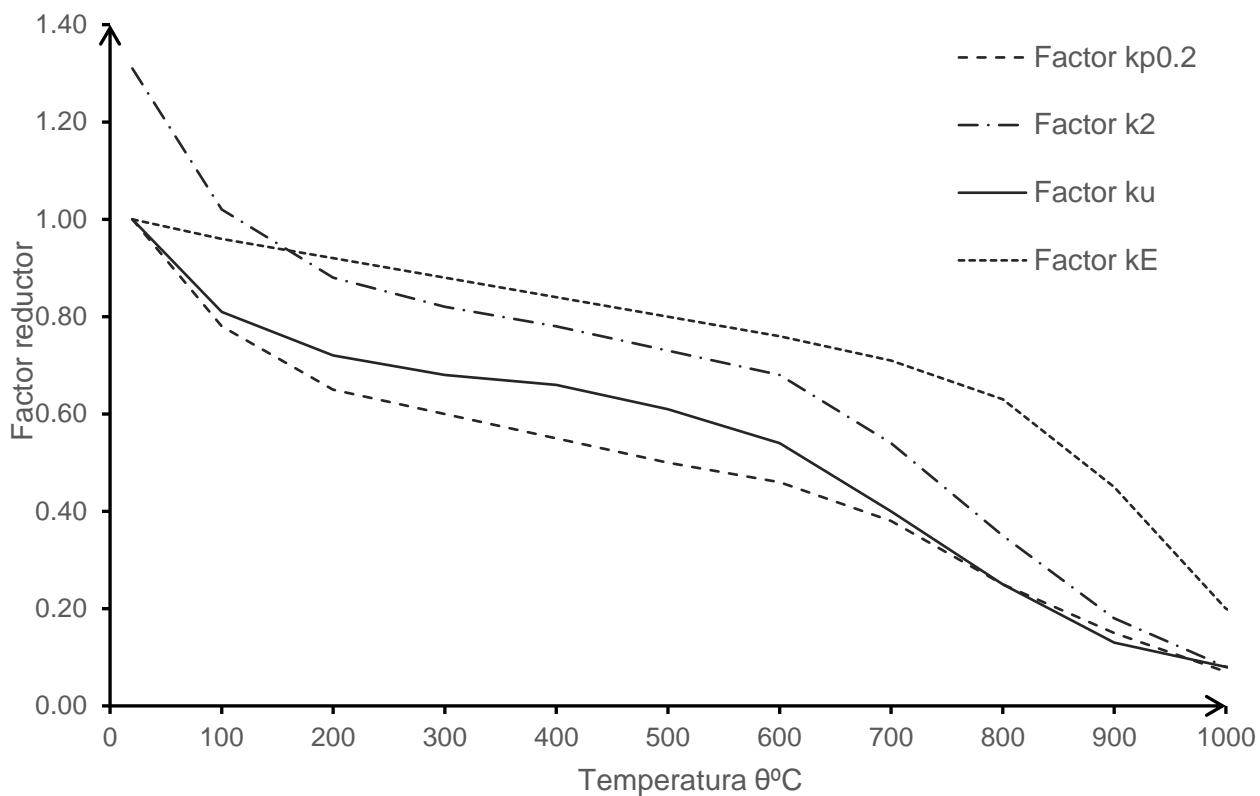


Figura 3.9 Factores de reducción de las propiedades del acero inoxidable Austenítico I a elevadas temperaturas

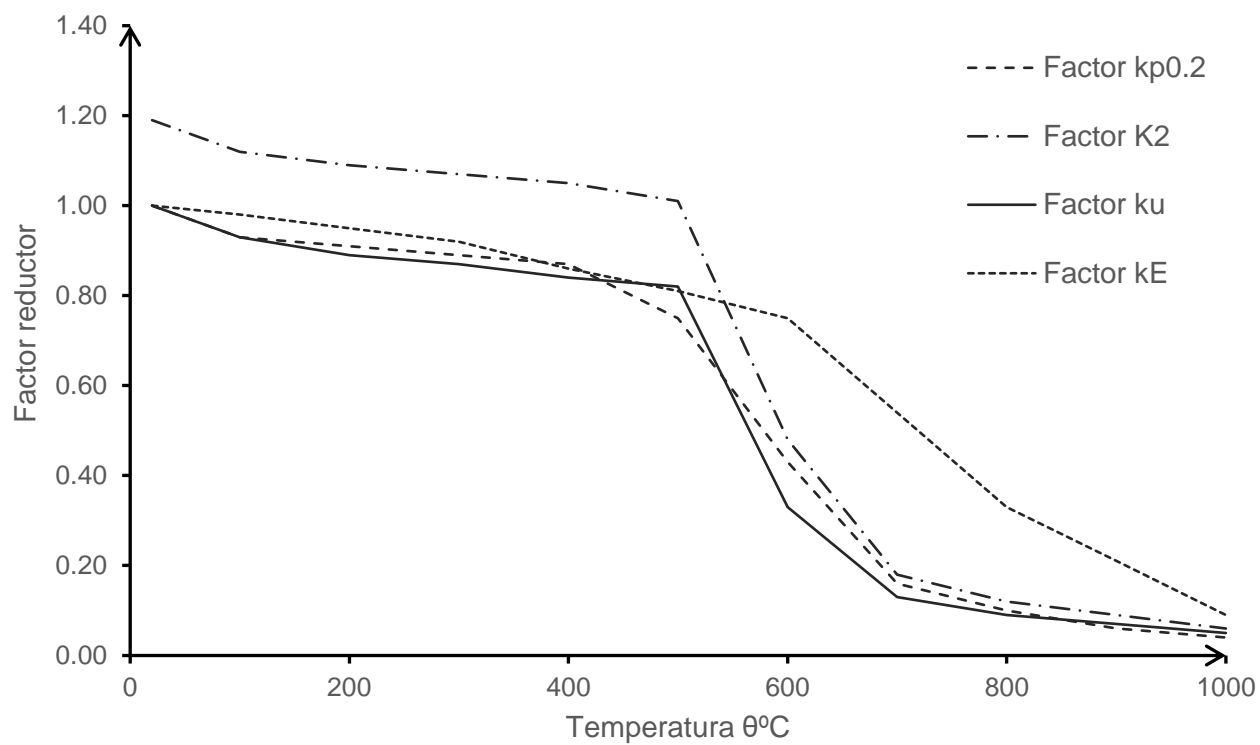


Figura 3.10 Factores de reducción de las propiedades del acero inoxidable Ferrítico II a elevadas temperaturas

Conociendo todos los datos necesarios pueden obtenerse las curvas tensión-deformación a diferentes temperaturas para aceros inoxidables. En particular, la Figura 3.11 y Figura 3.12 muestran las curvas para los grados 1.4301 (austenítico I) y 1.4003 (ferrítico II) respectivamente.

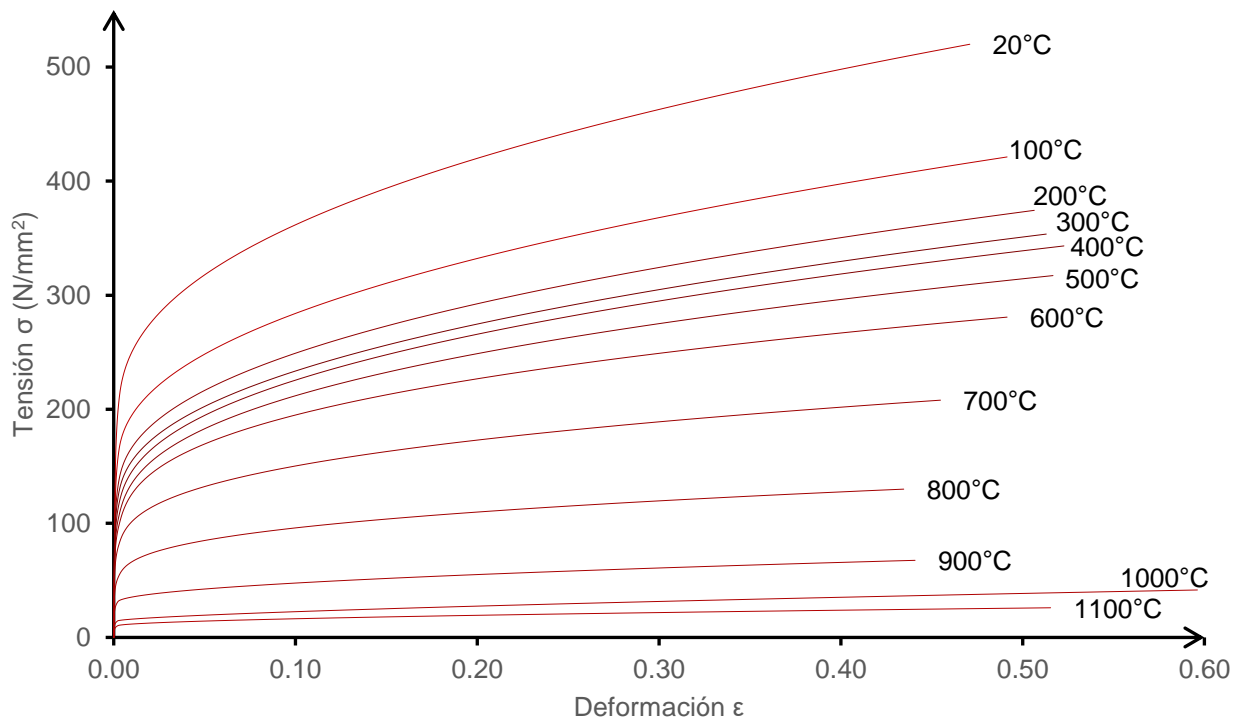


Figura 3.11 Diagrama tensión-deformación para Austenítico-I (1.4301) a diferentes temperaturas

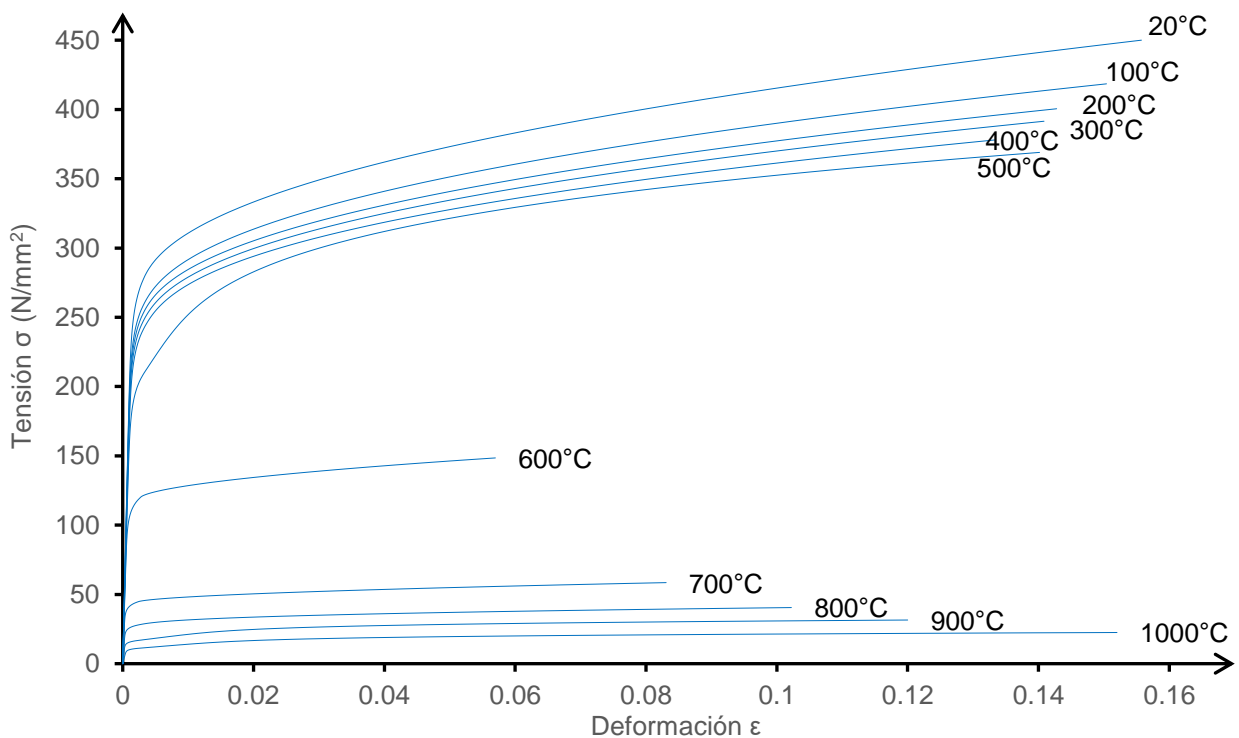


Figura 3.12 Diagrama tensión-deformación para Ferrítico II (1.4003) a diferentes temperaturas

3.2.5.1 Comprobación de estados límite últimos en situación de incendio

El método presentado en el apartado 3.1.3 para acero al carbono es similar al de los aceros inoxidables, pero con variaciones que se presentan a continuación.

En la clasificación de secciones transversales, para el cálculo de ε_0 en el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) [14] se considera el efecto de la reducción del módulo tangente inicial y el límite elástico definido para aceros inoxidables, tal como se puede observar en la ecuación (3.16).

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} / \xi_0 \quad \text{donde } \xi_0 = \sqrt{k_{2,0}/k_{E,0}} \quad (3.16)$$

Los rangos de la esbeltez c/t de los paneles comprimidos para clasificar la sección siguen siendo los de EN 1993-1-4 [1] (ver Tabla 1.2).

La resistencia de los elementos comprimidos está condicionada por el pandeo por flexión y puede calcularse como sigue:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{2,0} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (\text{para elementos no esbeltos}) \quad (3.17)$$

El valor de χ_{fi} se tomará como el menor entre $\chi_{y,fi}$ y $\chi_{z,fi}$, calculado según (3.18).

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{\phi_0^2 - \beta \bar{\lambda}_0^2}} \leq 1 \quad (3.18)$$

Para la expresión anterior es necesario obtener ϕ_0 y $\bar{\lambda}_0$, que se muestran en (3.19) y (3.21) respectivamente.

$$\phi_0 = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \beta \bar{\lambda}_0^2 \right] \quad (3.19)$$

Con β definido en la Tabla 3.8 y α es el factor de imperfección a elevadas temperaturas para pandeo por flexión.

$$\alpha = \alpha_0 / \xi_0 \quad \text{donde } \alpha_0 \text{ se encuentra en la Tabla 3.8} \quad (3.20)$$

Tabla 3.8 Valores de α_0 y β para pandeo por flexión, torsión y flexión - torsión [14]

Tipo de elemento	Eje de pandeo	Austenítico		Dúplex		Ferrítico	
		α_0	β	α_0	β	α_0	β
Acabados en caliente y conformado en frío de sección huecas	Cualquiera	0.80	0.75	0.60	0.80	0.40	1.00
Secciones abiertas soldadas o laminadas en caliente	Mayor	0.90	1.00	0.55	1.00	0.55	1.00
	Menor	0.90	1.50	0.55	1.50	0.55	1.50
Otras secciones	Cualquiera	1.00	1.50	1.00	1.50	1.00	1.50

En el caso de la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_\theta$ se calcula igual que a temperatura ambiente, pero considerando los factores de reducción del límite elástico y el módulo de elasticidad implícito en el cálculo de N_{cr} .

$$\bar{\lambda}_\theta = \xi_\theta \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (\text{para elementos no esbeltos}) \quad (3.21)$$

En caso de tener elementos muy esbeltos en los que deba considerarse los efectos de la abolladura local es necesario utilizar el área efectiva A_{eff} en las ecuaciones (3.17) y (3.21).

CAPÍTULO IV. Modelo numérico

En este apartado se describe el desarrollo de modelos de elementos finitos para el estudio paramétrico de un pilar sometido a una carga axial de compresión en situación de incendio, explicando el modelado geométrico, el comportamiento tensión-deformación del material, condiciones de contorno, cargas y las imperfecciones iniciales. El programa de elementos finitos empleado es el código Abaqus (2017).

4.1 Descripción del método

El método de elementos finitos es una aproximación de la realidad, transformada en una representación discreta con las siguientes características:

- Transforma un problema físico continuo en uno discreto, dividiéndolo en partes o elementos que simulan el comportamiento real de una situación en concreto. El proceso de división en partes se denomina discretización.
- La respuesta del problema se encuentra por medio de los nodos (puntos de unión entre elementos) que conforman la malla de puntos de discretización, buscando soluciones a las incógnitas definidas en cada nodo (grados de libertad) y su relación o compatibilidad con los elementos adyacentes.
- La respuesta varía en función del grado de discretización empleada, por lo que para obtener datos realistas es necesario realizar una aproximación fiel al problema, basándose en el conocimiento de la realidad física.

Una consecuencia natural de la implementación de este método, resultante del último punto descrito en sus características, es que conlleva en sí un porcentaje de error, el cual puede reducirse en la medida en que nuestra aproximación se acerca a la realidad.

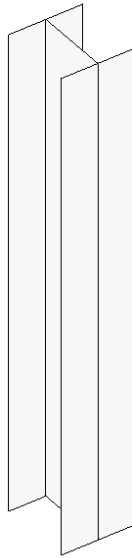
4.2 Geometría

Reproducir la geometría en el modelo puede llevarse a cabo de tres maneras: utilizando elementos unidimensionales tipo barra, elementos bidimensionales tipo Shell o tridimensionales sólidos (ver Figura 4.1). La elección de un tipo de elemento dependerá de la naturaleza del problema a analizar y el nivel de detalle que se quiera lograr; en este estudio, los pilares se modelizarán empleando elementos tipo Shell pues obtienen resultados más realistas que los elementos tipo barra y suponen menor tiempo de simulación que los sólidos; además, permiten reproducir fenómenos de abolladura local o estados tensionales relacionados con la presencia de rigidizadores. A efectos de este análisis se emplearán perfiles laminados en caliente HEB puesto que por su forma son absolutamente habituales en construcción y son muy eficientes estructuralmente para proyectar pilares. Se emplearán diferentes longitudes para cubrir un rango de esbelteces que permita trazar las curvas de pandeo a diferentes temperaturas.

Elementos barra



Elementos Shell



Elementos solidos

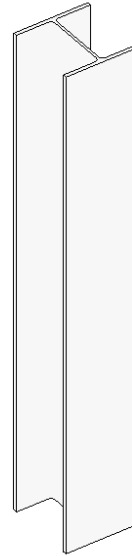


Figura 4.1 Tipos de elementos de modelización en FEM

Cuando se utiliza elementos barra, es necesario asignar una sección transversal para completar la información en 3D, en el caso de elementos shell se establece un espesor y en elementos sólidos no es necesario aportar información adicional.

4.3 Mallado

La malla consiste en subdividir la geometría, y determina el nivel de aproximación del modelo con la realidad, de forma que cuánto más fina sea la malla, menor será el error de los resultados. No sólo influye el tamaño de los elementos, además es necesario determinar el tipo de elementos, sean estos triangulares o cuadriláteros; para superficies curvas es más conveniente emplear elementos triangulares ya que se adaptan mejor a la forma, y en figuras planas ortogonales se puede utilizar elementos cuadriláteros pues en estos casos se adaptan bien a la forma geométrica y consumen menos recursos computacionales [15]. Dada la geometría rectangular del problema se emplea en el estudio mecánico el elemento cuadrilátero por defecto en Abaqus (ver Figura 4.2), el S4R de 4 nodos con integración reducida.

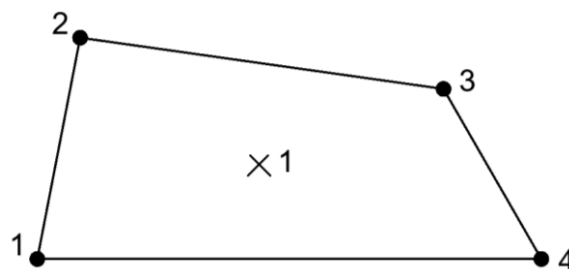


Figura 4.2 Elemento S4R de 4 nodos con integración reducida

Estos elementos contienen seis grados de libertad que son los desplazamientos y las rotaciones en los tres ejes espaciales. En el problema térmico el elemento S4R no puede reproducir los cambios

de temperatura a través del análisis ya que sus grados de libertad del campo de temperatura están restringidos y por tanto, cuando se reproduce un problema termo-mecánico acoplado se debe emplear elementos que tengan esos grados de libertad como el S4RT empleado en este estudio.

4.3.1 Optimización de malla y validación del modelo

Para aproximarnos a la solución de un problema estructural utilizando el método de los elementos finitos es necesario establecer el tipo de malla a utilizar, evaluando la calidad de la solución obtenida con esa malla y, de manera iterativa ir ajustándola [16]. Una noción formal de la malla óptima es relativamente tediosa de definir; es de notar que esta noción se extiende, en teoría, a una familia de mallas seleccionables en función del parámetro de medida elegido (tensiones, deformaciones entre otros). Además de optimizar la respuesta del parámetro de medición es necesario escoger la malla que tenga el tamaño o número de elementos mínimo a fin de que se reduzca el coste computacional; solo entonces se podrá argumentar que dicha malla es cuasi-óptima. Otro aspecto importante es la calidad de los elementos de la malla en relación a su forma, debiendo tener ésta un valor cercano a la unidad [15], lo que implica una relación de aspecto proporcional como se indica en la Figura 4.3.

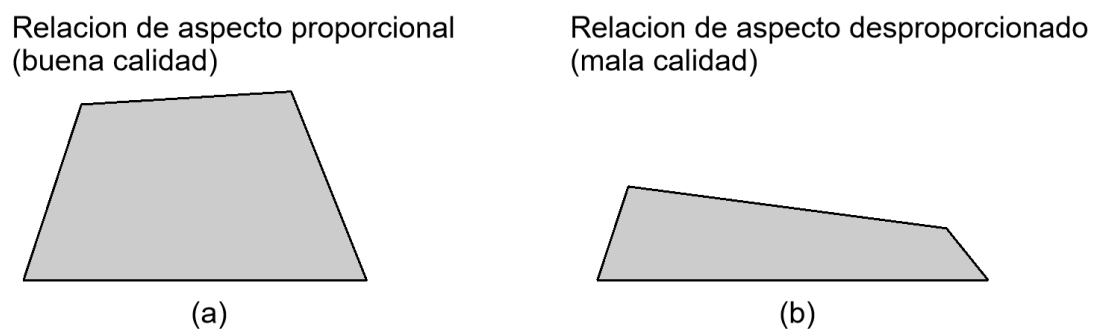


Figura 4.3 Relación entre dimensiones de elementos de mallados cuadriláteros

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se realizó un estudio de convergencia de resultados empleando diferentes tamaños de malla en un pilar de tres metros de longitud. A medida que se disminuye el tamaño “T” de los elementos finitos, aumenta su número “N”, tal y como se muestra en la Figura 4.4 de las mallas analizadas.

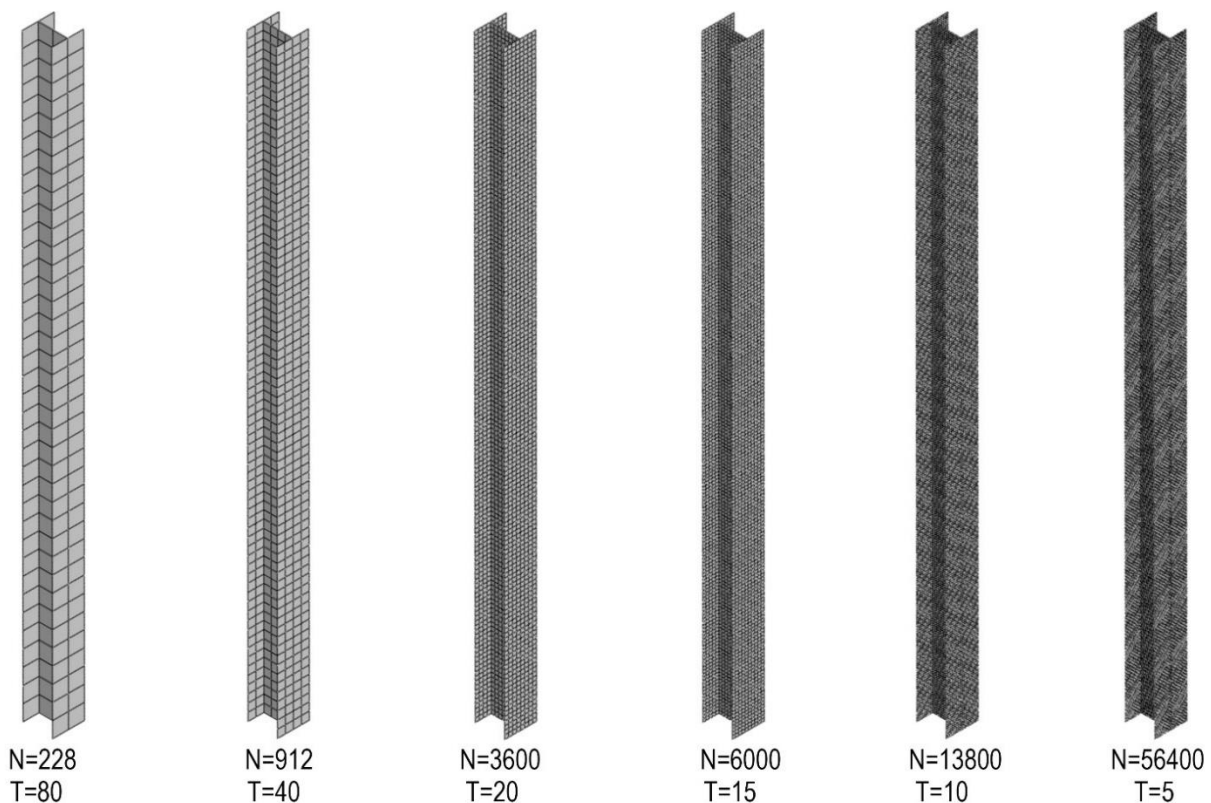


Figura 4.4 Mallas estudiadas para evaluar la malla óptima

La sensibilidad o convergencia de la malla se llevó a cabo con un análisis incremental de carga en función de un parámetro de longitud de arco del método Riks que se explica en el apartado 4.8.2 y utilizando el acero austenítico 1.4301 como referencia.

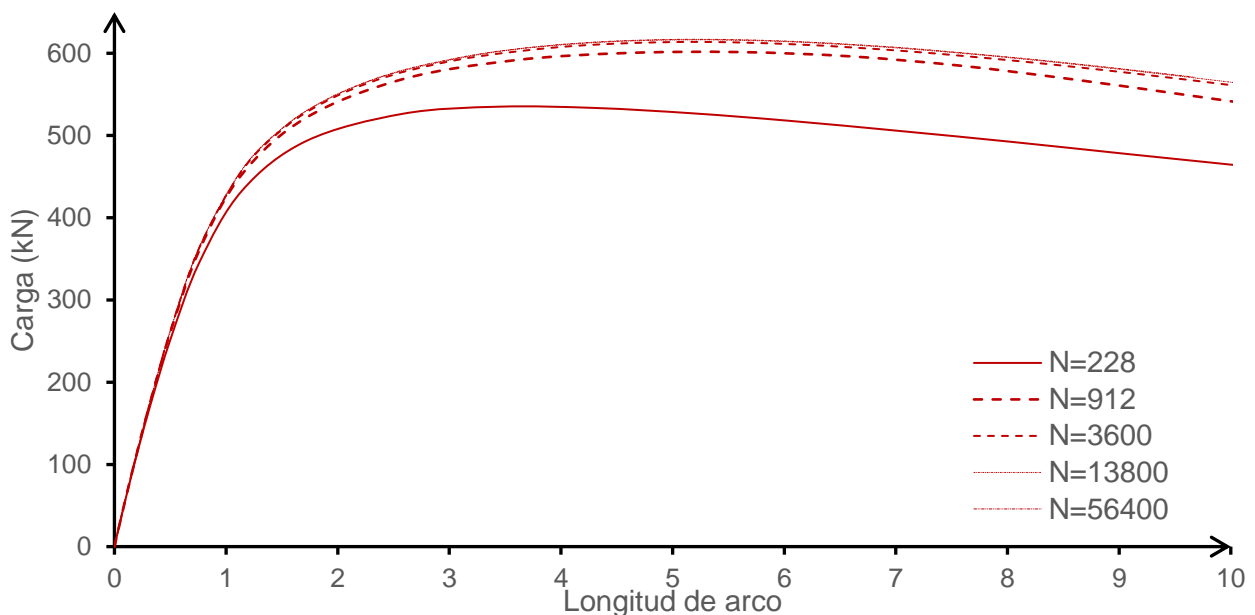


Figura 4.5 Diagrama de incremento de carga en función del parámetro de longitud de arco

En la Figura 4.5 se observa que a medida se aumenta el número de elementos, la respuesta tiende a cierto valor que se considera que representa fielmente la realidad física. Tomando como referencia

el valor máximo que alcanza la carga se puede apreciar mejor este comportamiento, tal y como se muestra en la Figura 4.6.

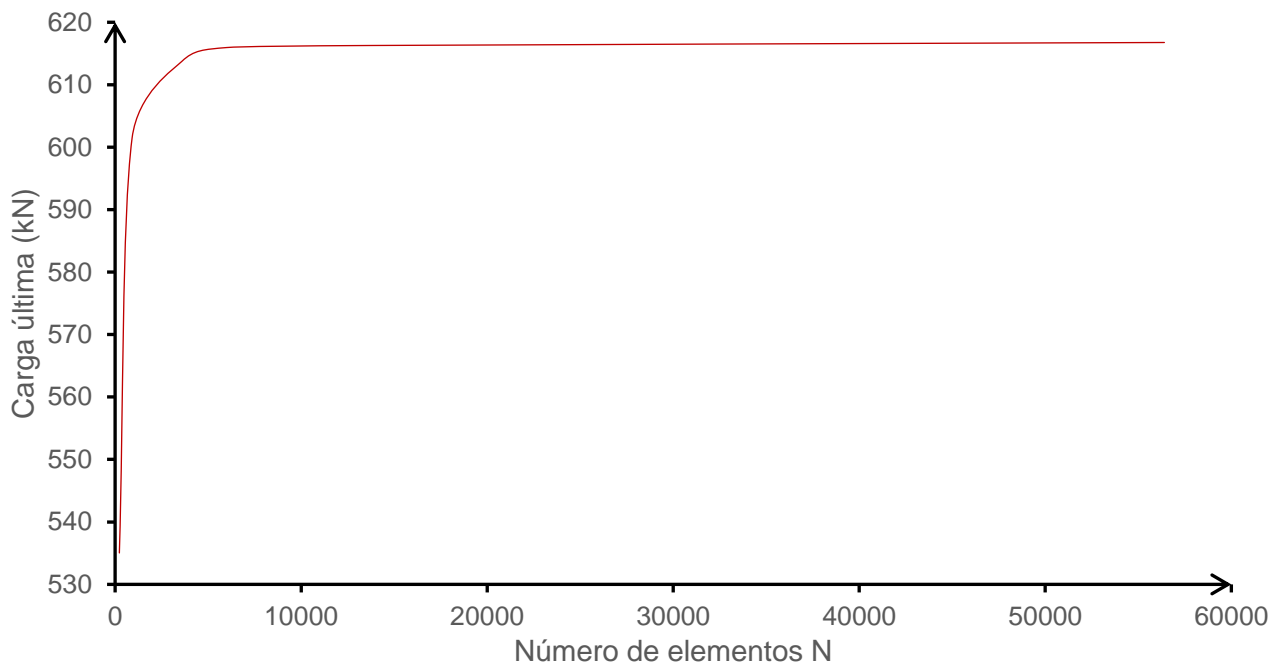


Figura 4.6 Resistencia última en función del número de elementos

Si bien se podría considerar siempre como mejor la malla con mayor cantidad de elementos, la óptima y buena será la que nos proporcione resultados con un nivel aceptable de precisión, tomando la que presente una variación menor al 1% respecto a la siguiente. Obteniendo como varía el resultado a medida que aumentamos el número de elementos, se obtiene la gráfica de la Figura 4.7 en la que se observa una variación menor al 1% a partir de 5000 elementos.

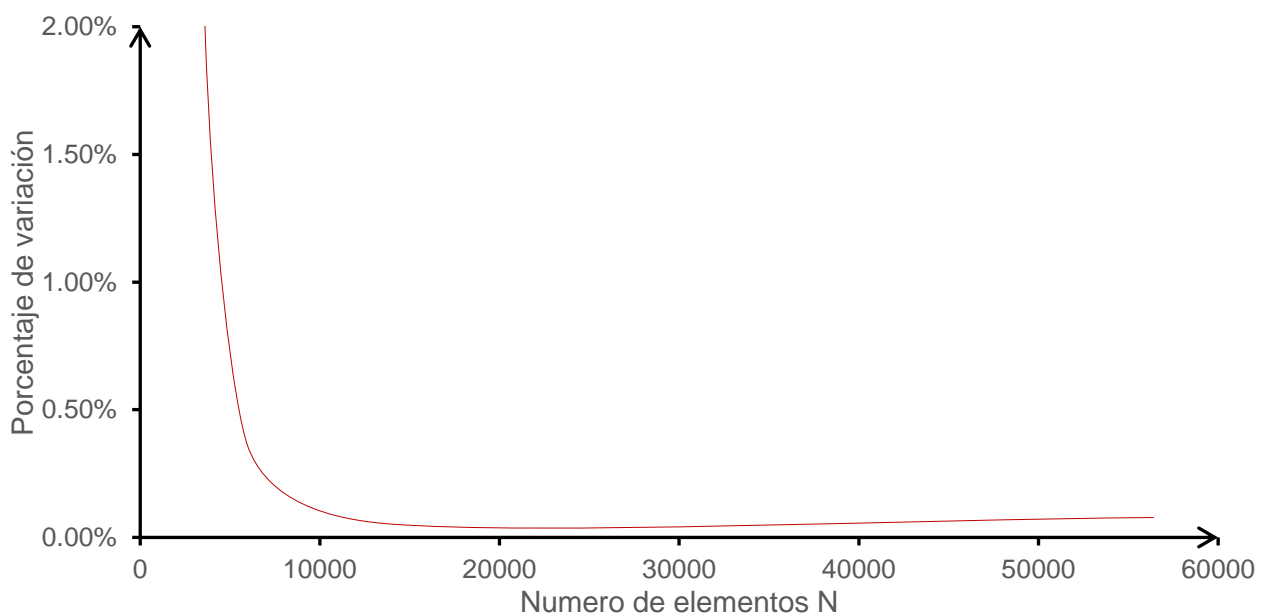


Figura 4.7 Porcentaje de variación de resultados según el número de elementos

El mismo análisis se llevó a cabo evaluando las tensiones en apoyos y en centro de luz obteniendo la misma tendencia de convergencia. Dado que el estudio involucra diferentes longitudes de pilar,

resulta más conveniente elegir la malla en función del tamaño de elementos “T” y en base a los resultados mostrados se decide utilizar, de las mallas presentadas en la Figura 4.4, la malla con $T=10$ que presenta una variación media en todos los puntos evaluados de 0.39%. Otra forma de validar el resultado es mediante la comparación del cálculo analítico respecto al obtenido del código Abaqus. Calculando la carga crítica empleando la ecuación (2.3) se obtiene un valor de 1947 kN y mediante el modelo de elementos finitos se alcanza el valor de 1935kN con una variación del 0.62%, tal y como muestra la tendencia de la Figura 4.8.

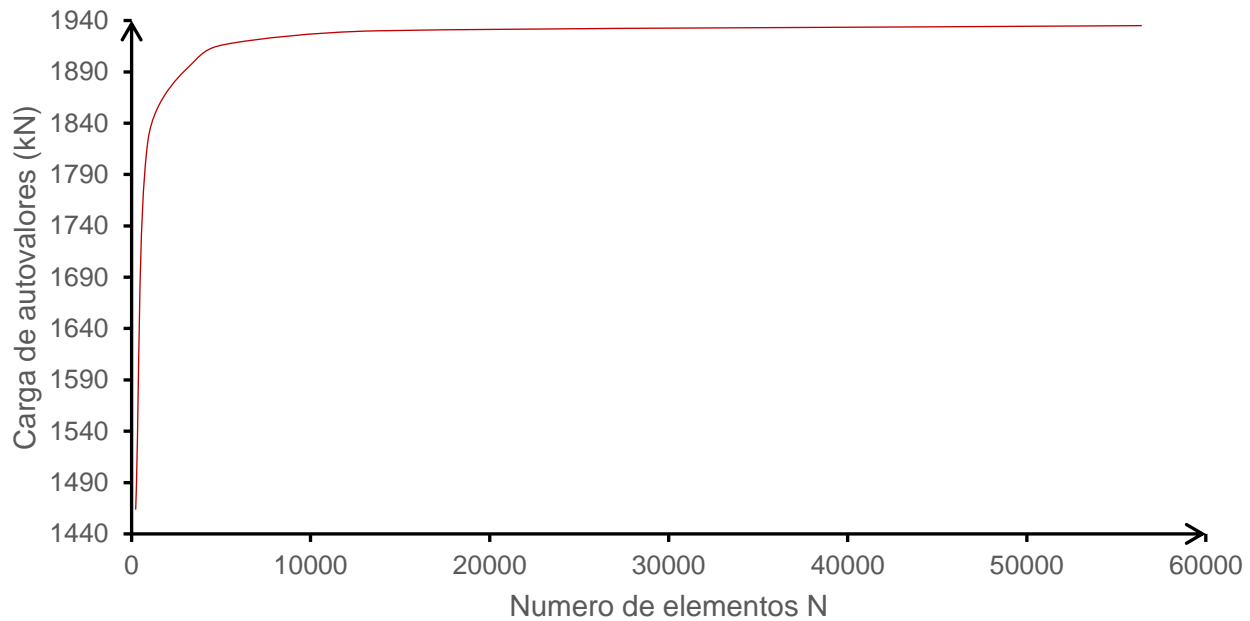


Figura 4.8 Resistencia última para el pandeo en el eje débil del análisis de autovalores, según el número de elementos

4.4 Propiedades del material

Abaqus aproxima el comportamiento no lineal de tensión-deformación del material con una serie de líneas rectas que unen los puntos de datos dados. Es posible utilizar cualquier cantidad de puntos para aproximar el comportamiento real del material y, por lo tanto, se puede conseguir una buena aproximación.

4.4.1 Relación constitutiva

Las deformaciones proporcionadas en los datos de prueba de materiales utilizados para definir el comportamiento plástico no son las deformaciones plásticas, ya que están definidas como deformaciones totales. Se debe por tanto descomponer estos valores de deformación total en los componentes de deformación elástica y plástica que utiliza el código Abaqus(ver Figura 4.9); la deformación plástica se obtiene restando la deformación elástica, (definida como el valor de tensión verdadero dividido por el módulo de Young), del valor de la deformación total (ver ecuación (4.1)) [17].

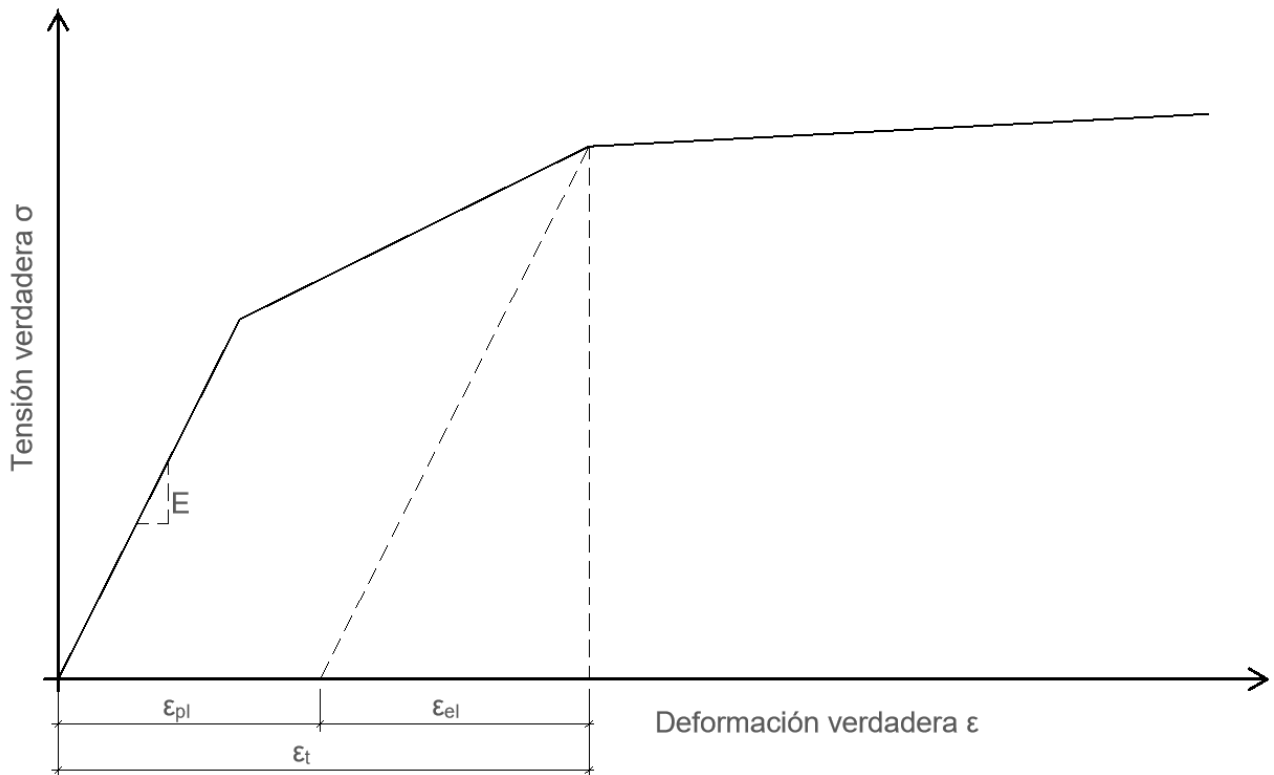


Figura 4.9 Diagrama tensión-deformación con deformaciones totales descompuestas en plásticas y elásticas

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} = \varepsilon_t - \frac{\sigma}{E} \quad (\text{deformación plástica}) \quad (4.1)$$

Los valores usados en la ecuación anterior deben ser los de la deformación y tensión verdadera.

4.4.2 Deformación verdadera

La relación entre cuanto se alarga o acorta un elemento con respecto a su longitud inicial es lo que se conoce como deformación y se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{nom} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (\text{deformación nominal}) \quad (4.2)$$

A diferencia de la deformación ingenieril o nominal con la que se trabaja habitualmente, la deformación verdadera considera el cambio de la longitud “L” para su cálculo, de manera que en lugar de dividir siempre por la longitud inicial L_0 (ecuación (4.2)) se divide entre la nueva longitud (ecuación (4.3)).

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad \text{Integrando ambos lados de la ecuación se obtiene la deformación verdadera} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} dL = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

Es conveniente expresar la deformación real en términos de la deformación nominal para utilizar en el modelo numérico, por lo que la ecuación (4.4) resulta más operativa.

$$\varepsilon_{nom} = \frac{L}{L_0} - 1$$

sumando la unidad a ambos lados y obteniendo el logaritmo neperiano

$$\ln(\varepsilon_{nom} + 1) = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

sustituyendo la ecuación (4.3) en el lado derecho de la expresión (4.4)

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{nom} + 1)$$

Deformación verdadera en términos de la deformación nominal

Por tanto, para operar correctamente en el modelo numérico, es necesario modificar, mediante la ecuación (4.4) los datos obtenidos de las gráficas en los apartados 3.1.2, 3.2.4 y 3.2.5 correspondientes a la relación constitutiva del acero al carbono y aceros inoxidables, respectivamente.

4.4.3 Tensión verdadera

La cantidad de fuerza por unidad de área es lo que se conoce como tensión y viene dada por

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_0}$$

(tensión nominal) (4.5)

La tensión ingenieril o nominal no considera el cambio del área “A” debido a la deformación (coeficiente de Poisson) y utiliza siempre el valor del área inicial A_0 (ecuación (4.5)); la tensión verdadera, en cambio, se obtienen dividiendo por el área real deformada en lugar del área inicial (ecuación (4.6))

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

(tensión verdadera) (4.6)

Es mejor relacionar la tensión verdadera en términos de valores nominales, para lo cual basándose en la naturaleza incompresible de la deformación plástica y asumiendo que la elasticidad también lo es, se puede relacionar el área verdadera como sigue:

$$AL = A_0L_0$$

(naturaleza incompresible de la deformación plástica y elástica) (4.7)

$$A = A_0 \frac{L_0}{L}$$

Relacionando la ecuación (4.6) con la (4.7) se tiene:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{L}{L_0}$$

Sustituyendo (4.2) y (4.5) (4.8)

$$\sigma = \sigma_{nom}(\varepsilon_{nom} + 1)$$

Tensión verdadera en términos de valores nominales

Es necesario, por tanto, modificar mediante la aplicación de la ecuación (4.8) los datos obtenidos de las gráficas en los apartados 3.1.2, 3.2.4 y 3.2.5.

4.5 Cargas

4.5.1 Esfuerzo axial

El uso de elementos tipo Shell para representar el perfil HEB lleva implícita ciertas consideraciones cuando se trata de la aplicación de una carga puntual. Las cargas puntuales en un modelo Shell o sólido aplicadas en un nodo introducen tensiones elevadas en la zona de aplicación, generando problemas de carácter numérico o que no responden a la situación real; esto se debe a que se introduce una gran concentración de fuerza en una región infinitesimal del espacio, cosa que no pasa en la realidad estructural. Por tanto, debe distribuirse la carga en una región más amplia, lográndose ello mediante condiciones añadidas de geometría, como es el acoplamiento de nodos que restringe los grados de libertad deseados de varios nodos a un nodo maestro. Se permite así la inserción de una carga puntual en el nodo maestro que se redistribuye en toda la sección; esta técnica además permite representar mejor las condiciones de contorno en el modelo numérico.

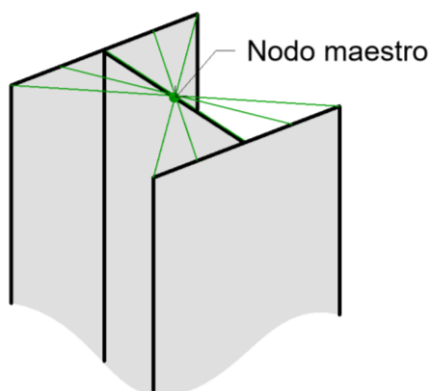


Figura 4.10 Técnica de acoplamiento de nodos (Coupling)

4.5.2 Carga térmica

De acuerdo con la ley de enfriamiento de Newton, cuando un cuerpo se encuentra con una diferencia de temperatura entre él y su entorno, la transferencia de calor entre su superficie (A) y el fluido que lo rodea puede ser determinada por convección según la ecuación (2.8) pero en términos de la densidad y el calor específico puede expresarse mediante la fórmula (4.9)

$$\rho V c \frac{d\theta}{dt} = h_c A (\theta - \theta_g) \quad (\text{flujo en términos del cambio de temperatura del elemento } \theta) \quad (4.9)$$

en la que h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección, θ_g es la temperatura del ambiente o fluido que lo rodea, V es el volumen del elemento y los parámetros ρ y c son la densidad y el calor específico del sólido que deberán ser especificados en las propiedades del material en el modelo. Crear este gradiente térmico en el modelo numérico se realiza estableciendo una interacción de temperatura en la que se introducen los valores de h_c y el campo de temperatura del ambiente θ_g en función del tiempo como se muestra en la Figura 2.12. Para generar el flujo de energía dentro del elemento según la expresión (2.8) es necesario introducir la propiedad de conductividad térmica en el material, mientras que los efectos de la temperatura sobre los

desplazamientos se realizan considerando en las propiedades del material la elongación en función de la temperatura. A partir de ello pueden derivarse los efectos secundarios de esfuerzos térmicos explicados en el apartado 2.6.1 (ver ANEJO A para observar los valores de la elongación, calor específico y conductividad térmica en función de la temperatura). Respecto a los valores de elongación presentados en dicho anejo es preciso encontrar el valor del coeficiente de dilatación térmica α en función de la temperatura y no el de la elongación para ingresar en el modelo numérico, por lo que siguiendo la formulación de (4.10) por derivación de las ecuaciones (A. 5) y (A. 6) se puede realizar dicha tarea.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta \theta \quad \text{reformulando y encontrando el límite cuando los cambios } \Delta \text{ tienden a cero} \quad (4.10)$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\theta} = \alpha$$

La carga térmica por radiación es considerada también como una interacción, pero con ciertas consideraciones adicionales. La función de la radiación descrita en (2.8), al igual que todas las acciones térmicas descritas, se encuentran formulada con unidades Kelvin para la temperatura, hasta el momento ese factor había sido irrelevante ya que el cambio total $\Delta \theta$ es el mismo en escala ° Celsius que en escala Kelvin, pero el término de temperatura en radiación se encuentra elevado a la cuarta potencia y por tanto se debe transformar la escala en ° C usada en este análisis a Kelvin como se muestra en (4.11) [3](este proceso se realiza en el modelo numérico estableciendo el punto de cero absoluto en -273°C).

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi A_s e_m e_f \sigma \left((\theta + 273)^4 - (\theta_g + 273)^4 \right) \quad (4.11)$$

En (4.11) se considera la emisividad del elemento e_m y la emisividad de las llamas e_f que a falta de valores específicos según EN 1991-1-2 [3] se pueden tomar como $e_f = 1$ y el factor de configuración como $\Phi = 1$, mientras que para la emisividad del material según EN 1993-1-2 [4] se usa para acero al carbono $e_m = 0.7$ y para acero inoxidable $e_m = 0.4$. La constante de Stefan Boltzmann tiene un valor de $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

4.6 Análisis de autovalores

Un análisis de autovalores persigue fundamentalmente encontrar las cargas para las cuales la matriz de rigidez de la estructura se convierte en singular. Este análisis se usa generalmente para determinar la carga crítica de pandeo de una estructura, la cual puede presentar diferentes modos como se vio en el ejemplo del apartado 2.4. Llevar a cabo esto supone calcular el valor mínimo del autovalor de la expresión generalizada para un problema de autovalores (ver ecuación (4.12)) [16]

$$K a = \lambda K_G a \quad (4.12)$$

donde a (autovector) es el conjunto de parámetros de discretización, K la matriz de rigidez del sistema, K_G es la matriz de rigidez geométrica o de estabilidad y λ (autovalor) es el parámetro relacionado con la intensidad de las cargas aplicadas. En un problema estructural de autovalores se busca encontrar en la ecuación (4.12) el valor mínimo de $\lambda_{min} = \lambda_{cr}$ que admite una solución no trivial al modo de pandeo, es decir el valor de carga mínima que genera un problema de

inestabilidad. En algunos casos el primer autovalor no necesariamente será el caso de estudio como por ejemplo en elementos muy robustos en el que los primeros valores de λ conciernen a otro tipo de fenómeno que no necesariamente se corresponden a un problema físico real. En tales situaciones es preciso tener un conocimiento de la naturaleza física del problema y elegir el modo de pandeo que le concierne. Un ejemplo de ello se observa en la Figura 4.11 donde el cuarto autovalor claramente no responde a una solución real, aunque el primer y segundo autovalor en este caso sí, pues corresponden al pandeo en el eje débil y fuerte respectivamente. Para la obtención de los valores de la Figura 4.11 se analizó un pilar de cuatro metros de altura, biapoyado y bajo un axil de compresión de 1000kN, y el número del autovalor asignado a cada modo corresponde al valor por el cual se tendría que multiplicar la carga asignada para que se dé dicha forma de inestabilidad, se emplea $E=200\,000\text{N/mm}^2$.

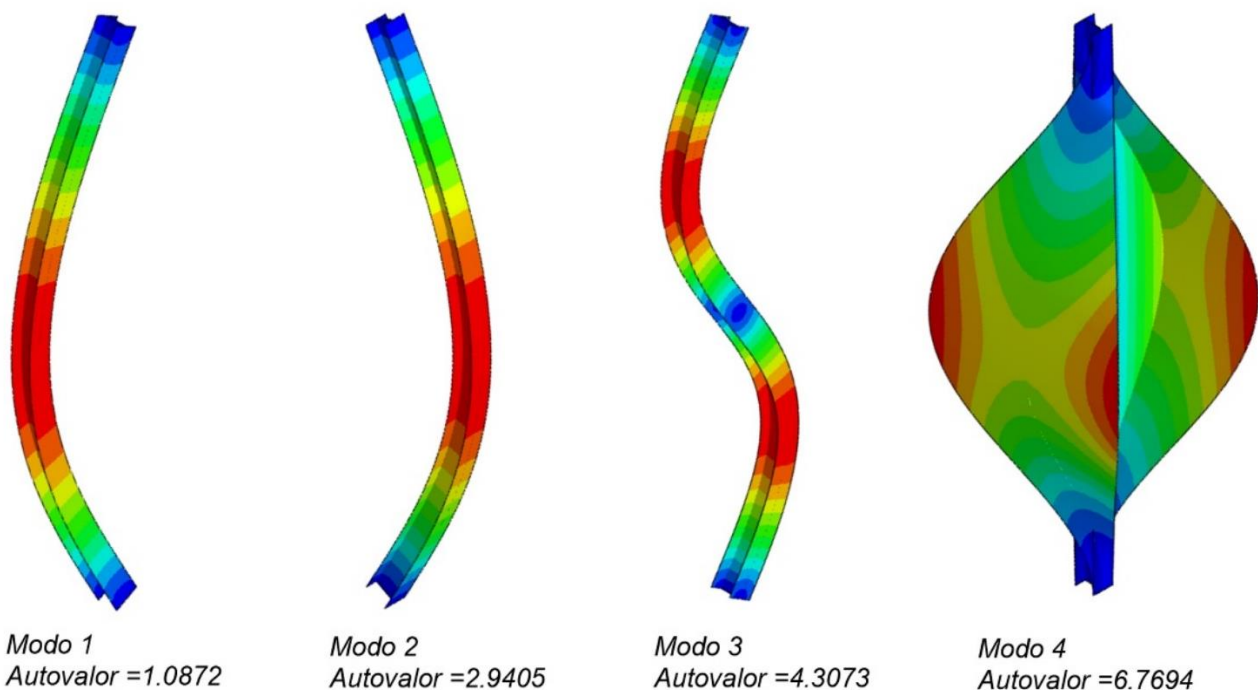


Figura 4.11 Primeros cuatro autovalores de un pilar de cuatro metros a compresión

4.7 Tensiones residuales e imperfecciones geométricas

Tal y como se explicó en los apartados 2.4.4 y 2.4.5, la consideración de las imperfecciones geométricas y las tensiones residuales serán llevadas a cabo mediante la adopción de imperfecciones geométricas iniciales de amplitud e_0 , afines al modo de pandeo, para una mejor aproximación al problema real. El cálculo de la amplitud e_0 en situación de incendio varía en función de la norma como se muestra en las ecuaciones (4.13) y (4.14).

$$e_0 = \alpha \bar{\lambda}_0 \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \quad \text{EN 1993-1-2} \quad (4.13)$$

$$e_0 = \alpha_0 \bar{\lambda} \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \quad \text{Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)} \quad (4.14)$$

4.8 Análisis no lineal

Realizar un análisis de autovalores puede ser suficiente para la evaluación del diseño en casos simples, pero si se quiere tener en consideración la no linealidad del material, o la no linealidad geométrica antes del pandeo, debe realizarse un análisis de carga-desplazamiento para investigar el problema con mayor profundidad. Para dicho análisis será necesario resolver varias ecuaciones algebraicas simultáneas, como la (4.15), y en problemas no lineales, un conjunto de ecuaciones en forma residual como la (4.16) [17].

$$f = K a \quad (4.15)$$

$$\psi(a) = f - P(a) = 0 \quad (4.16)$$

donde f es el vector de fuerzas y ψ es la función residual entre el vector de fuerzas y la trayectoria de equilibrio P . Un problema estructural no lineal es aquel en el que la rigidez de la estructura cambia a medida que esta se deforma; puesto que todas las estructuras en la realidad tienen este tipo de comportamiento, un análisis no lineal sería siempre el adecuado, pero para simplificar el procedimiento de diseño un análisis lineal resulta a veces una aproximación útil. Dado que la rigidez depende ahora del desplazamiento, la relación entre cargas aplicadas y desplazamientos deja de ser directamente proporcional y la matriz de rigidez de la estructura se debe ensamblar e invertir muchas veces durante el curso del análisis en un proceso iterativo e incremental, haciendo además no aplicable el principio de superposición para estudiar otros casos y cada combinación de carga debe definirse y resolverse mediante un análisis diferente. Resulta más conveniente escribir la ecuación (4.15) en términos de incrementos e iteraciones, tal como se recoge en la fórmula (4.17) [17]

$$\psi^{i+1}_n = K_n da^i_n \quad (4.17)$$

donde el superíndice “i” indica el incremento y el superíndice “n” el número de iteración. En algunas ocasiones cuando el conjunto de fuerzas f se consideran proporcionales por un mismo factor entre sí, como en el caso del problema de autovalores, se puede escribir que

$$\Delta f^i = \Delta \lambda^i f_0 \quad (4.18)$$

en la cual λ es el parámetro de proporcionalidad de la carga y f_0 es el conjunto de cargas iniciales. Existen varias alternativas por métodos numéricos para resolver los problemas no lineales como el método de Newton-Raphson, el Newton-Raphson modificado o el método de la longitud de arco (siempre que sea posible, el código Abaqus utiliza el método de Newton-Raphson para resolver problemas no lineales, en algunos casos, utiliza una implementación exacta del método de Newton-Raphson).

4.8.1 Método de Newton-Raphson

Este método numérico consiste básicamente en hacer aproximaciones mediante incrementos en el dominio de las ordenadas o las abscisas hasta llegar a la solución con un mínimo de error (residuo). Para cada iteración el método utiliza la recta tangente en ese punto para acercarse rápidamente a la solución (ver Figura 4.12); el inconveniente de éste método es que requiere resolver y formar el jacobiano (matriz de rigidez) para cada iteración, haciendo costoso el proceso en un modelo

numérico, además de presentar problemas de convergencia para seguir la trayectoria de equilibrio (función P) cuando se encuentra el primer punto crítico, es decir cuando la tangente se vuelve cero [17]. El método funciona bien y resuelve el problema en pocas iteraciones si la respuesta es estable, es decir que no tiene cambios bruscos o de inversión de signos en la recta tangente (sin reblandecimiento). El método tiene una variante de uso más extendido denominado método Newton-Raphson modificado que, en lugar de calcular la matriz tangente para cada iteración, la fija en un inicio y la mantiene constante en cada incremento (ver Figura 4.13). El método Newton-Raphson modificado requiere más iteraciones, pero evita recalcular la matriz de rigidez para cada paso [18].

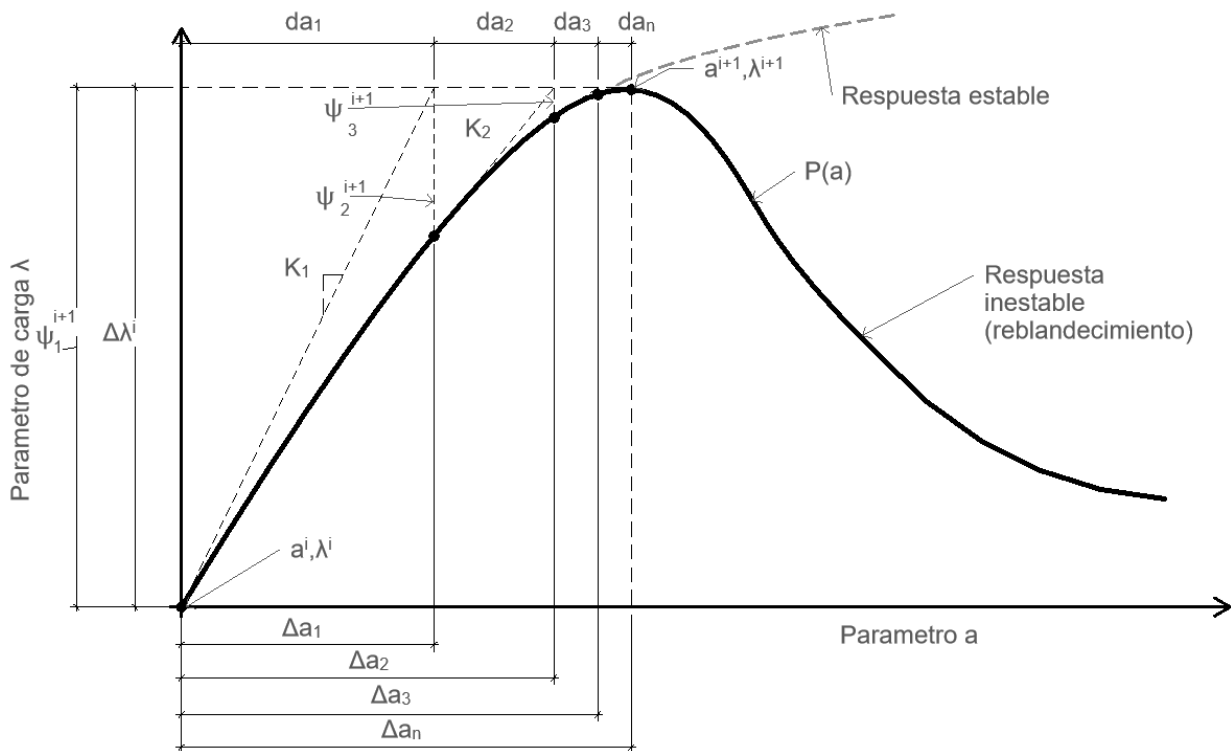


Figura 4.12 Método de Newton-Raphson

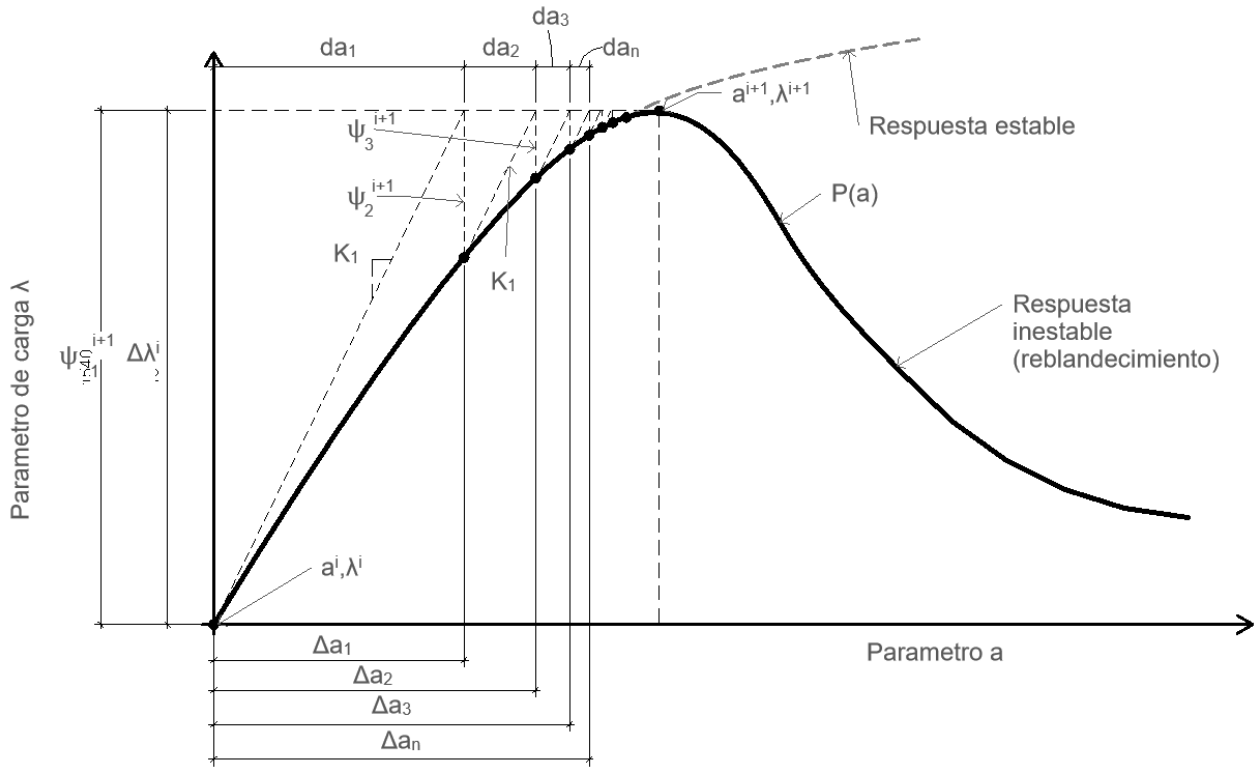


Figura 4.13 Método de Newton-Raphson modificado

4.8.2 Método Riks

A diferencia del método de Newton-Raphson el método de longitud de arco o comúnmente denominado método de Riks, interpreta la magnitud de la carga como una incógnita adicional, ya que controla simultáneamente incrementos en las cargas y desplazamientos en lugar de uno solo y por tanto se utiliza otra cantidad para medir el progreso de la solución (longitud de arco); esta nueva incógnita produce la necesidad de una restricción adicional para resolver el sistema de variables (ver ecuación (4.19)) [17].

$$\Delta \lambda_n^2 f_0^T f_0 + \Delta a_n^T \Delta a_n = \Delta L^2 \quad (4.19)$$

Este enfoque ha probado ser el más eficiente puesto que da soluciones independientemente de si la respuesta es estable o inestable. En lugar de fijar un incremento en el parámetro de carga o en el de desplazamiento, el método Riks fija un incremento definido por la longitud de arco de circunferencia de radio ΔL y el siguiente punto de iteración es el de la intersección de dicho arco con la trayectoria de equilibrio; el avance entre puntos el método utiliza Newton-Raphson pero con la delimitante del arco (ver Figura 4.14).

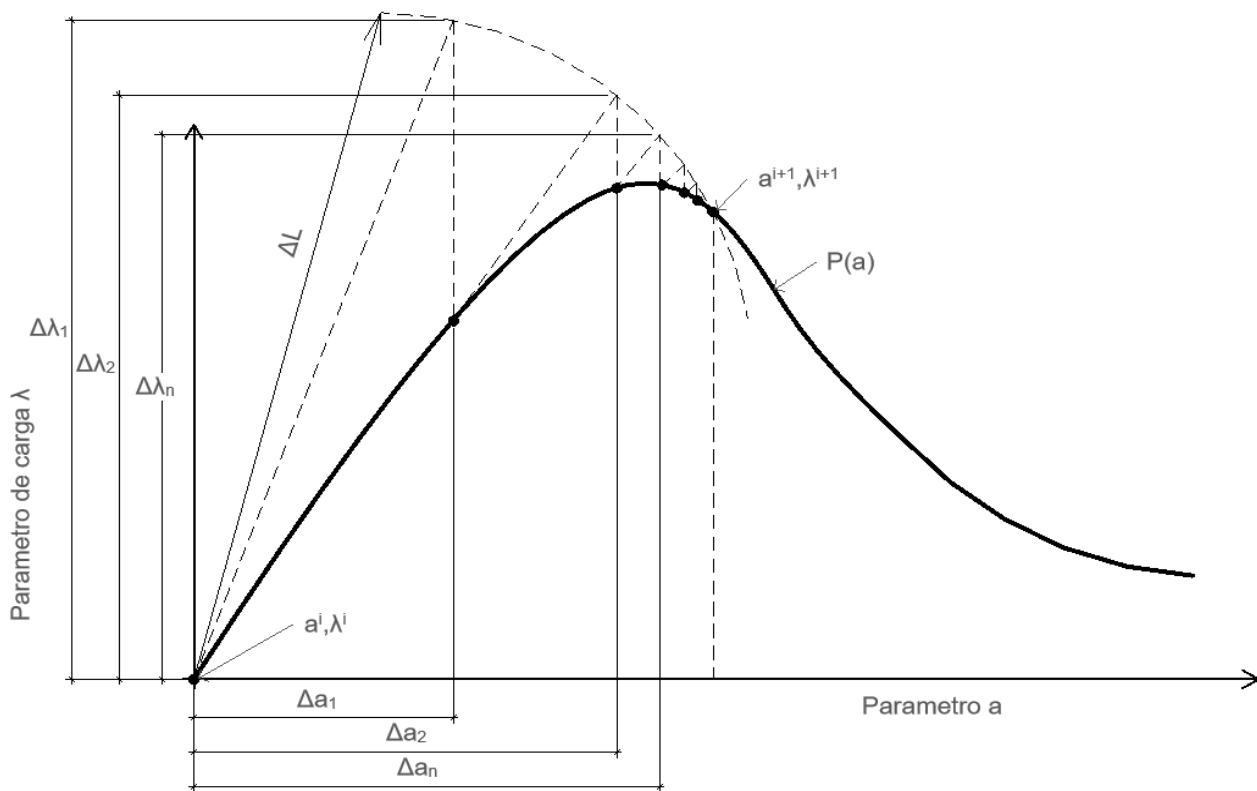


Figura 4.14 Método de longitud de arco (Riks)

Como se observa en la Figura 4.14 el método Riks puede trazar el camino de equilibrio incluso si éste es inestable y presenta una zona de reblandecimiento. El código Abaqus utiliza el método descrito, pero con ciertas variaciones (método de Riks modificado), ya que en lugar de utilizar el radio como delimitante utiliza una recta perpendicular a la tangente.

4.8.3 Análisis temperatura- desplazamiento acoplado

Es un tipo de análisis no lineal en el código Abaqus, donde las temperaturas y los desplazamientos se resuelven simultáneamente. Este permite tener en cuenta la acción de la temperatura sobre los desplazamientos por medio de la expansión térmica y la acción de los desplazamientos sobre la temperatura por medio de la energía de deformación. Es necesario establecer un campo predefinido de temperatura en elemento como temperatura inicial (20°C), de otra forma, el código numérico asumirá como temperatura inicial 0°C. En cada incremento de tiempo, el método calcula el intercambio de energía del sistema con su entorno, tal como se expresa en la ecuación (4.20).

$$\frac{dH}{dt} = R - \nabla Q \quad (4.20)$$

En la ecuación anterior H es la entalpía o energía almacenada en el sistema, R es la fuente de calor y ∇Q es el flujo de calor absorbido de acuerdo con la ley de conductividad térmica. Es importante señalar que los efectos de la radiación en cavidad y el efecto sombra no son considerados en este análisis, pues el código numérico solo puede considerar dichos efectos en problemas de transferencia de calor que no involucren deformaciones, por medio de la definición de radiación por cavidad o por medio de elementos sólidos empleando la aproximación por cavidad en la radiación.

Sin embargo, se realizan aproximaciones empleando el factor k_{sh} de EN 1993-1-2 en la radiación para considerar el efecto de sombra. En problemas donde solo se considera la transferencia de calor, cada cavidad define una matriz de factor de visual, que involucra las relaciones geométricas entre las superficies en la cavidad. Si las superficies se encuentran en movimiento, esta matriz de factor visual debe ser recalculada por cada incremento de tiempo, haciendo el cálculo de radiación en cavidad costoso computacionalmente.

CAPÍTULO V. Estudios realizados y análisis de resultados

Se presentan en este capítulo los resultados obtenidos a través de dos planteamientos elegidos para el análisis estructural.

En el primer planteamiento se realiza la verificación en el dominio de la resistencia en el que se extraen resultados basándose en las propiedades mecánicas de los aceros empleados y en como varían éstas en función de la temperatura analizada. La primera ley de la termodinámica dice que, en un proceso termodinámico el cambio de la energía interna del sistema depende solo del estado inicial y final, no del trayecto que lo lleva de un estado a otro; esto nos permitirá evaluar la resistencia del sistema mecánico cuando adquiere una temperatura determinada, haciendo caso omiso del proceso que lo lleva a este a tener esa temperatura y del tiempo que le tomó llegar a ella. También se asume que el pilar permite la dilatación para evitar los esfuerzos térmicos explicados en el apartado 2.6.1, que se generan al restringir sus extremos. Bajo el supuesto de una distribución de temperatura homogénea en todo el elemento, se realizó un análisis de pilares de longitudes hasta ocho metros por ser las dimensiones más comunes en edificios residenciales e industriales y para cubrir un rango de esbelteces amplio, con temperaturas: 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C y 1000°C, que son las temperaturas para las que se poseen datos específicos (las temperaturas intermedias requieren interpolación). Los materiales usados son el acero inoxidable 1.4301 y 1.4003 (austenítico y ferrítico respectivamente) por ser de los más comunes en la construcción, y el acero al carbono S275.

El segundo planteamiento muestra los resultados en el dominio del tiempo considerando no solo la variación de las propiedades mecánicas respecto a la temperatura, sino también las propiedades térmicas de los materiales. Considerando un pilar interior en un espacio confinado, se establece una primera fase de puesta en carga en la que se somete el pilar a un esfuerzo axial de compresión a diferentes grados de utilización (20°C) de los valores obtenidos del estudio del dominio de la resistencia, en condiciones normales antes de sobrevenir el incendio. Posteriormente, se introduce una segunda fase con el pilar ya cargado, en la que se reproduce la acción del fuego por medio de un campo de temperatura del ambiente en función del tiempo, determinado por la curva nominal tiempo-temperatura de la ecuación (2.15)(curva ISO 834). El campo de temperatura resultante real en el elemento depende del espesor del mismo, pero considerando que es un espesor muy pequeño la temperatura puede considerarse constante a lo largo de su espesor y solo variar a lo largo del elemento por lo que se justifica la utilización de elementos tipo Shell como modelización. Se analiza una sola altura de cuatro metros como intermedio de la tipología de edificación estudiada, y con los materiales ya definidos con anterioridad: acero inoxidable 1.4301, 1.4003 y acero al carbono S275. La Tabla 5.1 muestra un resumen de las consideraciones en cada análisis.

Tabla 5.1 Resumen de los análisis empleados

Características	Verificación	
	Dominio de resistencia	Dominio del tiempo
Geometría	Perfil HEB160	Perfil HEB160
Longitud (m)	1,2,3,4,5,6,7,8	4.0
Condiciones de contorno	Biapoyado	Biapoyado
Modelización	Elementos Shell	Elementos Shell
Elemento finito	S4R	S4RT
Tamaño de elemento finito	10mm	10mm
Materiales	Austenítico 1.4301, Ferrítico 1.4003, Acero al carbono S275	Austenítico 1.4301, Ferrítico 1.4003, Acero al carbono S275
No linealidad material	Sí	Sí
Imperfecciones iniciales	Sí	Sí
Esfuerzo axial de compresión	Análisis incremental	Según grado de utilización μ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Temperatura (°C)	20,100,200,300, 400,500,600,700 800,900 y 1000	Curva de incendio nominal de EN 1991-1-2 (ISO 834)
Tipo de análisis	Estático Riks	En fases: 1.-Estático 2.-Temperatura-desplazamiento acoplado

Se elige un perfil HEB160 tomando como referencia de pre-dimensionamiento $L/20$ para un pilar de altura media tres metros de alto en edificios residenciales e industriales, y con las propiedades descritas en la Tabla 5.2 (no se considera el radio r en la geometría).

Tabla 5.2 Propiedades geométricas de perfil HEB 160

	b	160mm	t_w	8.0mm
	h	160mm	t_f	13.0mm
	h_i	134mm	d	104mm
	A	5430mm ²	r	15.0mm
	I_y	2492.2x10 ⁴ mm ⁴	I_z	889.2x10 ⁴ mm ⁴
	$W_{el,y}$	311.5x10 ³ mm ³	$W_{el,z}$	111.2x10 ³ mm ³
	$W_{pl,y}$	354x10 ³ mm ³	$W_{pl,z}$	170.0x10 ³ mm ³
	i_y	67.8mm	i_z	40.5mm
	Perímetro	918mm	Sección Clase 1	

Para visualizar mejor los datos presentados en los siguientes apartados, se muestra en la Figura 5.1 la forma de fallo y distribución de tensiones del pilar según el análisis empleado, tomándose de referencia, un pilar de cuatro metros de altura cuando falla a 500°C. Aunque en ambos planteamientos la estructura falla por pandeo por flexión, la geometría deformada y la distribución de tensiones es diferente en ambos planteamientos. Este resultado es debido a la diferencia en la distribución de temperatura en el elemento en cada caso (ver Figura 5.17).

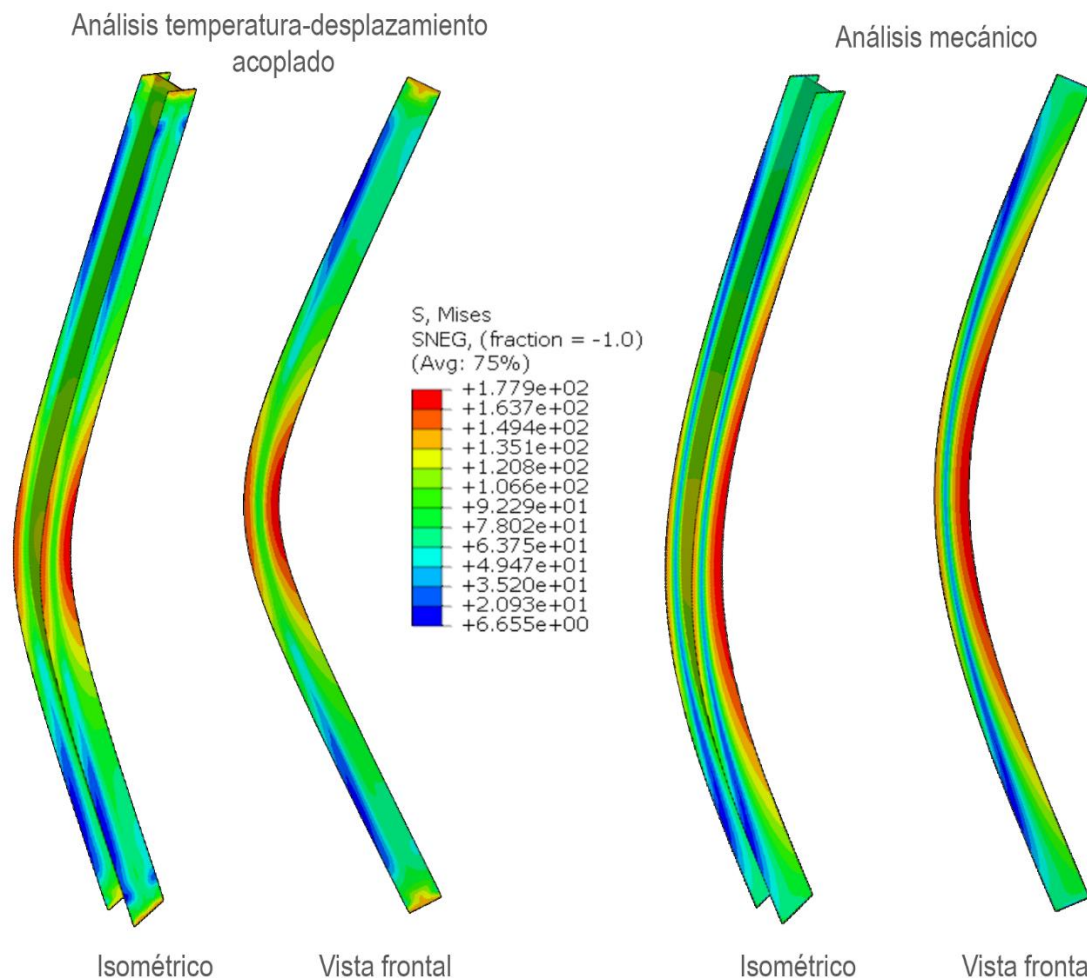


Figura 5.1 Modos de fallo en análisis mecánico y análisis temperatura-desplazamiento acoplado, y su distribución de tensiones

5.1 Verificación en dominio de la resistencia

5.1.1 Comparación entre normativa EN 1993-1-2 y propuesta de Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) para acero inoxidable

Se debe establecer en primera instancia las relaciones constitutivas y formulaciones analíticas de trabajo, por lo que se realizó una comparación de la norma EN 1993-1-2 en vigencia y la propuesta del Anejo C de EN 1993-1-2 en revisión para evaluar la que ofrece mejores resultados y tomarla como referencia de cálculo. El análisis se realizó adoptando una temperatura de 300°C.

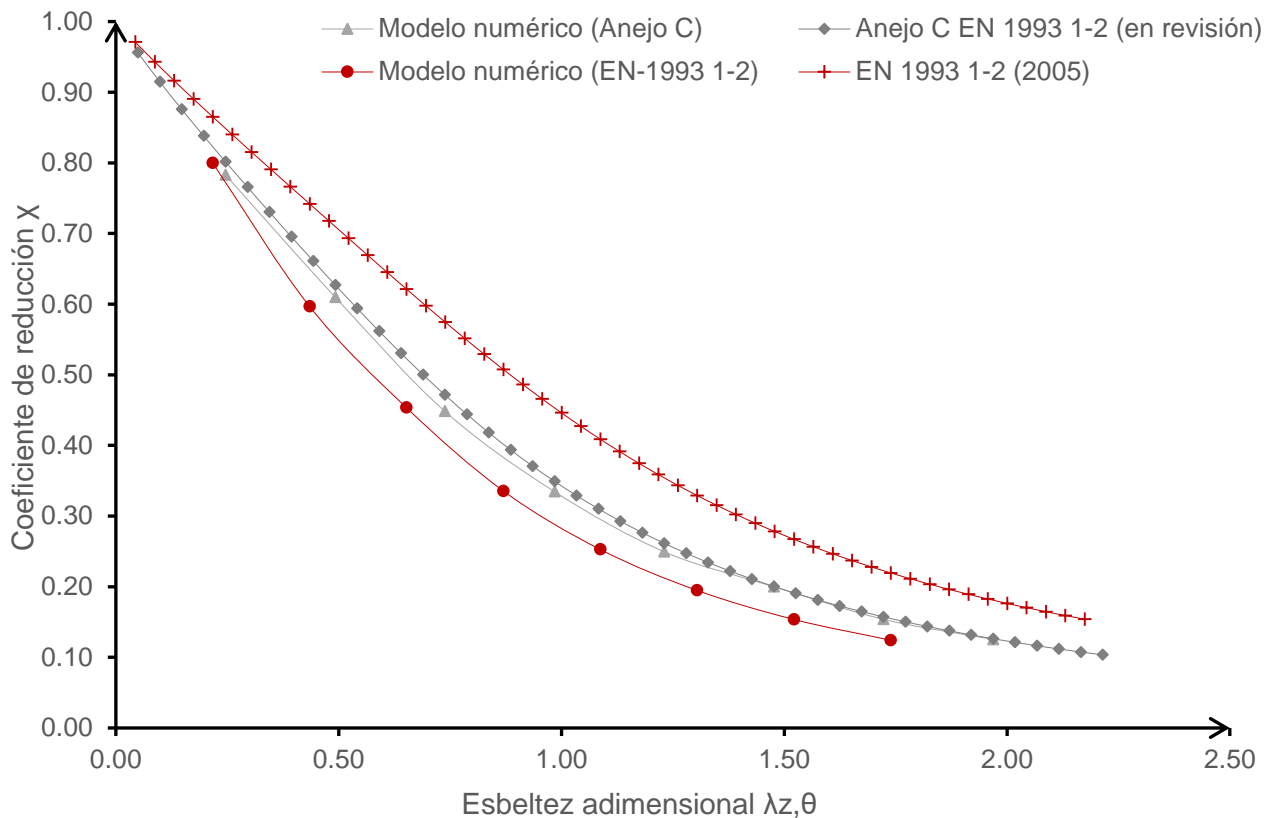


Figura 5.2 Comparación de resultados del acero austenítico 1.4301, entre el modelo numérico y EN 1993-1-2 (en rojo), y entre el modelo numérico y Anejo C EN 1993-1-2 (en gris) a 300°C

La Figura 5.2 muestra que los resultados utilizando la normativa vigente EN 1993-1-2 para el acero austenítico 1.4301, están por encima de los obtenidos del modelo numérico, por lo que presenta valores más optimistas que los valores del modelo numérico (condición no favorable en diseño estructural). La desviación media respecto a los valores del modelo numérico es 0.1358 para los valores de χ , siendo el coeficiente de variación del 37.33%. Por otro lado, aunque el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) también tiene algunos datos por encima de los valores del modelo numérico, éstos se encuentran más próximos a los valores del código Abaqus, aproximando mejor el comportamiento del elemento. El Anejo C (en revisión) obtiene un valor de la desviación media respecto al modelo numérico de 0.0139 y un coeficiente de variación del 3.84%.

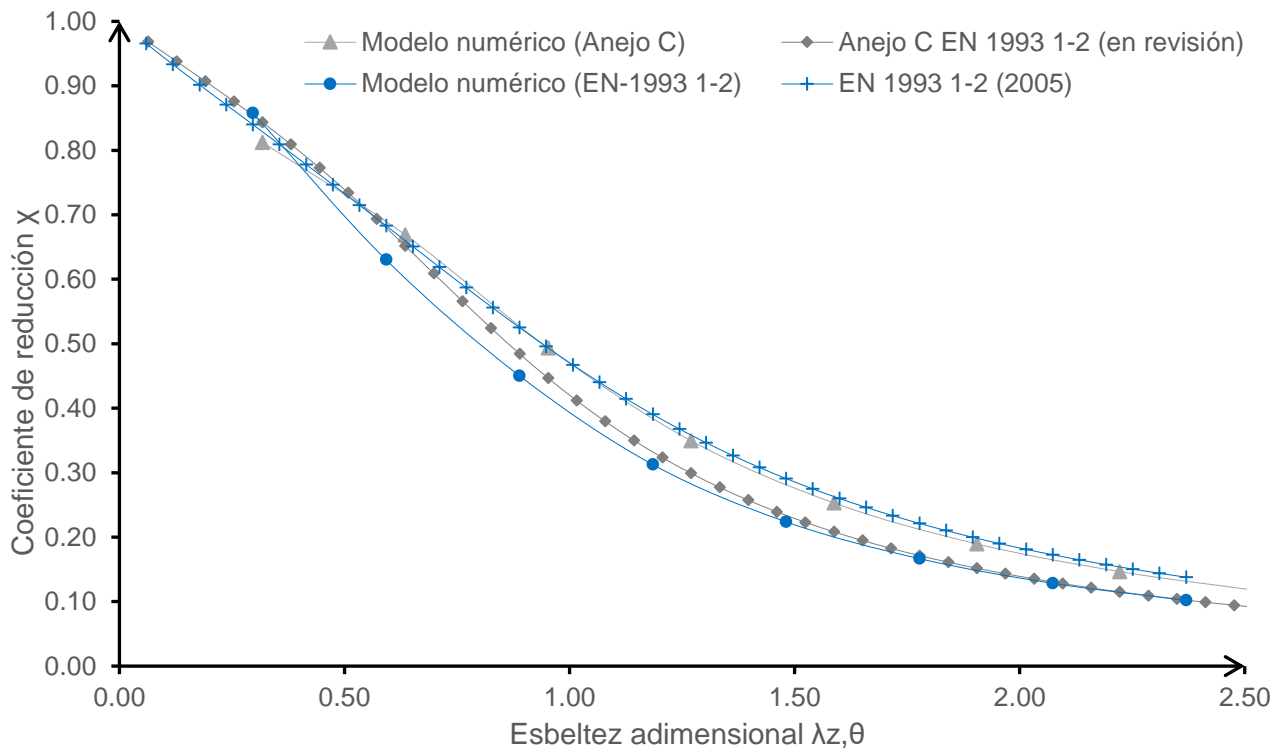


Figura 5.3 Comparación de resultados del acero ferrítico 1.4003, entre el modelo numérico y EN 1993-1-2 (en azul), y entre el modelo numérico y Anejo C EN 1993-1-2 (en gris) a 300°C

Como se muestra en la Figura 5.3, en lo que respecta al acero ferrítico 1.4003 empleando la norma EN 1993-1-2 se obtienen valores por encima de los valores obtenidos con el modelo numérico, mostrando una desviación típica en relación a los resultados del modelo de 0.0564 para los valores de χ , y un coeficiente de variación del 15.73%. Tiene una mejor respuesta que el acero austenítico, pero aun con valores por encima del modelo. Utilizando el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) la mayoría de los datos se encuentran por debajo del resultado numérico, con una desviación típica respecto al modelo de 0.0373 y un coeficiente de variación del 9.85%. Si bien para este caso en concreto hablar de la bondad del ajuste con la desviación tipo y el coeficiente de variación sería suficiente para la elección del modelo analítico ya que las formulaciones que proponen ambos métodos son similares y sin muchos parámetros ni complejidad, se prueban los modelos con el criterio de información Akaike (AIC) para tomar una decisión en base a un método de selección de modelos que considera los coeficientes de la función paramétrica; cuanto menor sea el valor obtenido por el criterio Akaike, mejor será el modelo propuesto. Este modelo emplea el valor de máxima verosimilitud $L(\theta|\chi_n)$ para evaluar el criterio de bondad del ajuste y otro término que considera el nivel de complejidad por usar muchos parámetros para definir la función, tal como se muestra en la ecuación (5.1).

$$AIC = -2 \ln(L) + 2k \quad (5.1)$$

En la ecuación (5.1), L es el valor máximo de la verosimilitud y k el número de coeficientes empleados en la función paramétrica. La ecuación de la verosimilitud se entenderá en este caso como la función densidad de probabilidad (función de densidad) que los valores del modelo analítico (θ) sean menores a los valores obtenidos del modelo numérico (χ_n). Un resumen de los resultados obtenidos se observa en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Valores obtenidos de bondad de ajuste y selección de modelos AIC para la norma EN 1993-1-2 vigente y el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)

Austenítico 1.4301		
	EN 1993-1-2 (2005)	Anejo C EN 1993-1-2(en revisión)
Desviación típica	0.1358	0.0139
Coefficiente de variación	37.33%	3.84%
$L(\theta \chi_n)$	5.39E-07	9.37E-04
k	1	2
AIC	30.87	17.95
Ferrítico 1.4301		
	EN 1993-1-2 (2005)	Anejo C EN 1993-1-2(en revisión)
Desviación típica	0.0565	0.0373
Coefficiente de variación	15.73%	9.85%
$L(\theta \chi_n)$	5.48E-07	1.49E-03
k	1.00	2.00
AIC	30.83	17.02

A la vista de los resultados anteriores se decide trabajar con el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) para definir la ecuación constitutiva a temperatura y evaluarla con su analítica para los aceros inoxidables.

5.1.2 Acero austenítico 1.4301

Las curvas de pandeo resultantes para el acero austenítico 1.4301 empleando el Anejo C EN 1993-1-2 en revisión se acercan a las obtenidas del modelo numérico, tal como se muestra en la Figura 5.4.

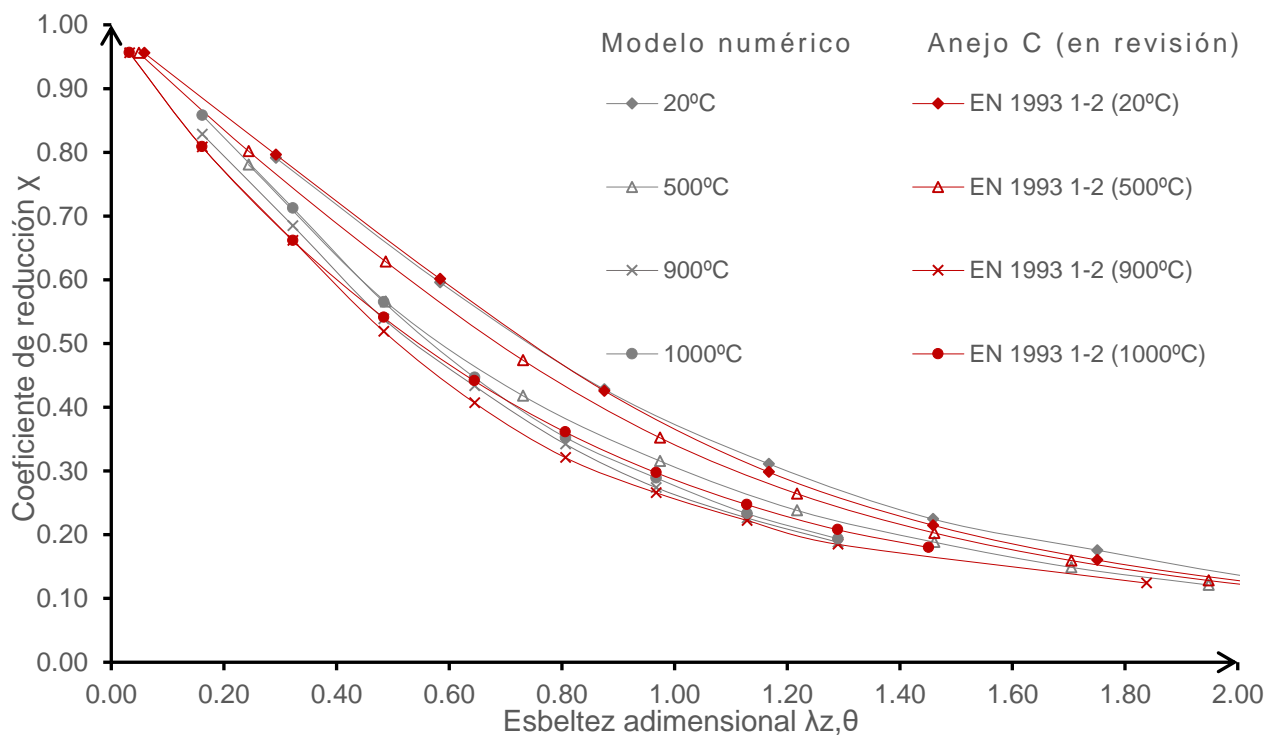


Figura 5.4 Curvas de pandeo para acero austenítico 1.4301 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico

Con desviaciones típicas por debajo de 0.036 para los valores de χ , pero con muchos datos aún por encima del resultado numérico; la curva analítica se adapta bien a la forma de la curva resultante del modelo numérico, por lo que mantener una proporción cercana a los valores empleados para α_0 y β será una condición favorable. La curva analítica predice bien los resultados a temperaturas no tan elevadas, pero a partir de 500°C la curva se separa notablemente del resultado numérico a excepción de 900°C y 1000°C que se vuelve a aproximar (Ver otras temperaturas analizadas en ANEJO C). Una posible inferencia de este resultado sea la relación de los factores $k_{p0.2}$ y k_u que son considerados en el modelo numérico y no en la formulación analítica, y como se observó en la Figura 3.9 a 500°C, k_u disminuye a un ritmo más acelerado.

5.1.3 Acero ferrítico 1.4003

Las curvas del ferrítico según el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) no se adaptan tan bien a la forma de las curvas del modelo numérico en las temperaturas iniciales, pero a partir de 600°C la aproximación mejora considerablemente, como se observa en la Figura 5.5. Presenta, igual que el acero austenítico 1.4301 valores pequeños de desviación típica y por debajo de 0.072 para los valores de χ , aunque el acero ferrítico 1.4003 en su mayor parte obtiene valores por debajo de los resultados numéricos; a diferencia de la curva a 900°C y 1000°C que se separan considerablemente, por lo que una pequeña corrección en el factor α_0 sería suficiente (Ver otras temperaturas analizadas en ANEJO C). Nuevamente una posible inferencia de este comportamiento se encuentra en la Figura 3.10 donde la relación que controla el factor α_θ que depende de k_2 y k_E tiene un punto de intersección justo antes de los 600°C.

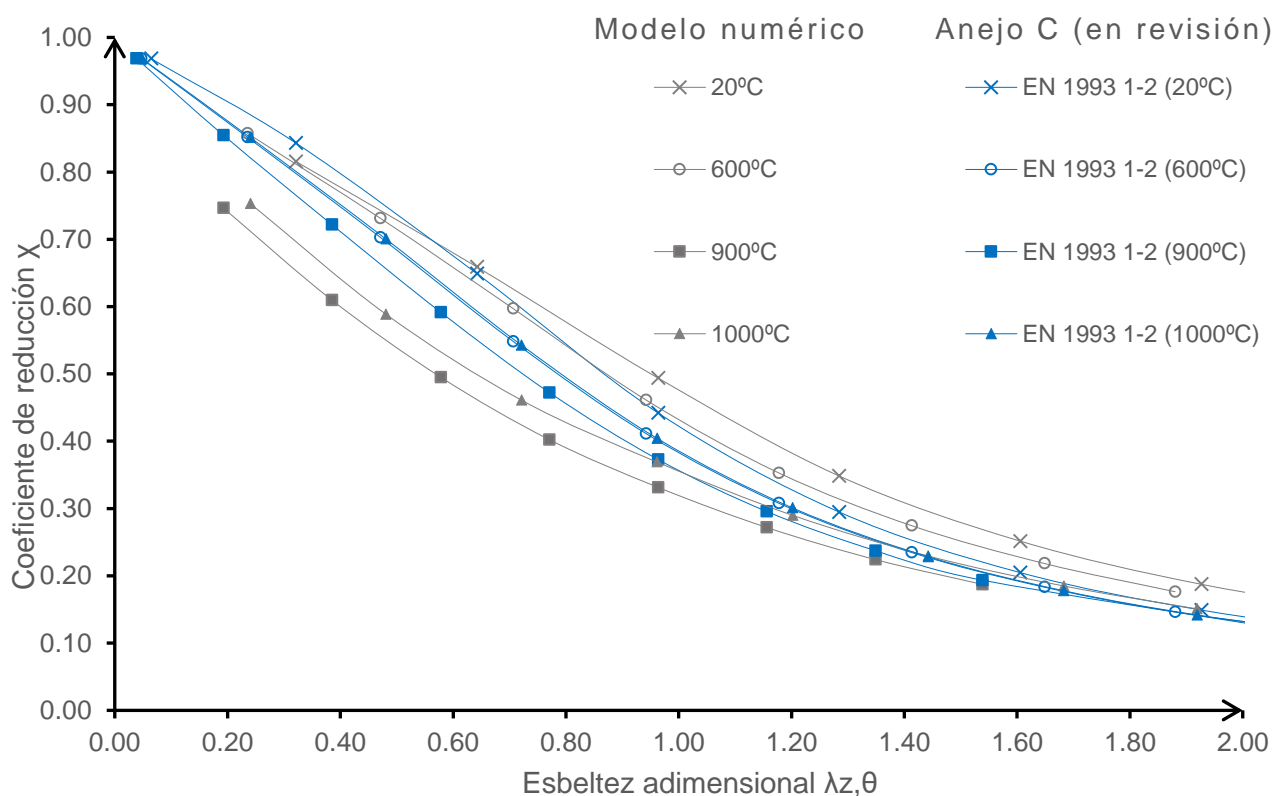


Figura 5.5 Curvas de pandeo para acero ferrítico 1.4003 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico

5.1.4 Acero al carbono S275

La gráfica analítica del acero al carbono a 20°C se obtuvo empleando la norma EN 1993-1-1 ya que los resultados del modelo numérico presentan un comportamiento con una zona plana inicial muy marcada hasta una esbeltez adimensional de 0.20; este resultado se adapta muy bien y con valores seguros para el diseño. No obstante, al utilizar la EN 1993-1-2 en el que todas las curvas a fuego son las mismas dado que el factor α_θ es constante en esta formulación y no depende de la temperatura, se obtienen resultados optimistas en el diseño frente a incendio como se muestra en la Figura 5.6 (Ver otras temperaturas analizadas en ANEJO C).

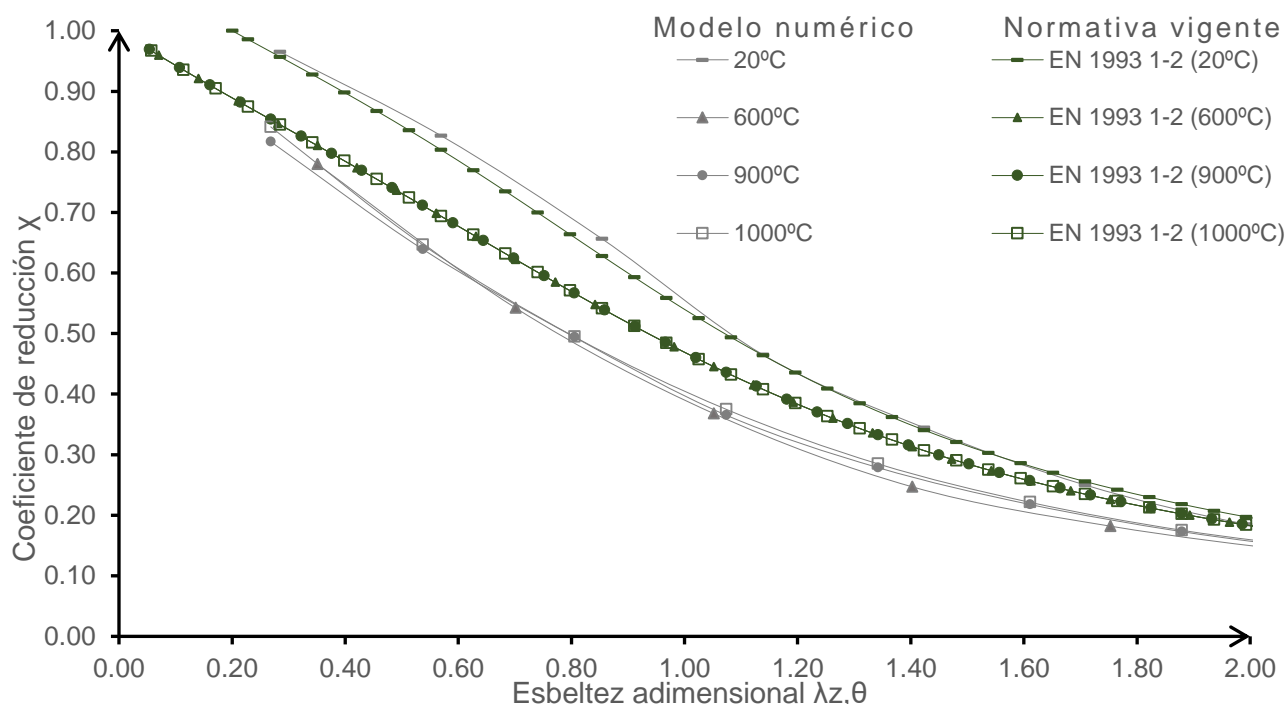


Figura 5.6 Curvas de pandeo para acero al carbono S275 obtenidas de EN 1993-1-1 para 20°C, EN 1993-1-2 para elevadas temperaturas, y del modelo numérico en Abaqus

5.1.5 Comparación de resistencia última al fuego del pilar, empleando acero inoxidable y empleando acero al carbono

Para establecer una comparación en el dominio de la resistencia, se hace uso de la carga última resistente a cada temperatura para evaluar las bondades de un material sobre otro a elevadas temperaturas. Se estudia la comparativa considerando un pilar bajo las mismas condiciones geométricas y cambiando sólo el material de fabricación. Se pretende determinar la carga última que resiste dicho pilar a elevadas temperaturas, mostrando los resultados en la Figura 5.7. Aunque a temperatura ambiente y a 100°C usando acero al carbono se obtiene mejores resistencias, la situación cambia a 200°C donde empleando acero ferrítico, el pilar resiste más que utilizando acero al carbono y este último más que el austenítico. Posteriormente, a 600°C, usando los dos aceros inoxidables el pilar resiste más que usando acero al carbono, tendencia que se mantiene a temperaturas superiores. Es de notar que, aunque la comparativa resulta más apropiada entre el ferrítico 1.4003 y el acero S275 ya que tienen límites elástico muy similares a temperatura ambiente de 280N/mm² y 275 N/mm² respectivamente, el austenítico 1.4301 con un límite elástico a 20°C de

210N/mm² mucho menor, obtiene mejores resultados en términos de resistencia que el acero al carbono a partir de 600°C y que el ferrítico a partir de 700°C con gran diferencia. Ya sea desde el punto de vista del austenítico o del ferrítico es notable que los aceros inoxidables conservan mejor sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas que el acero al carbono.

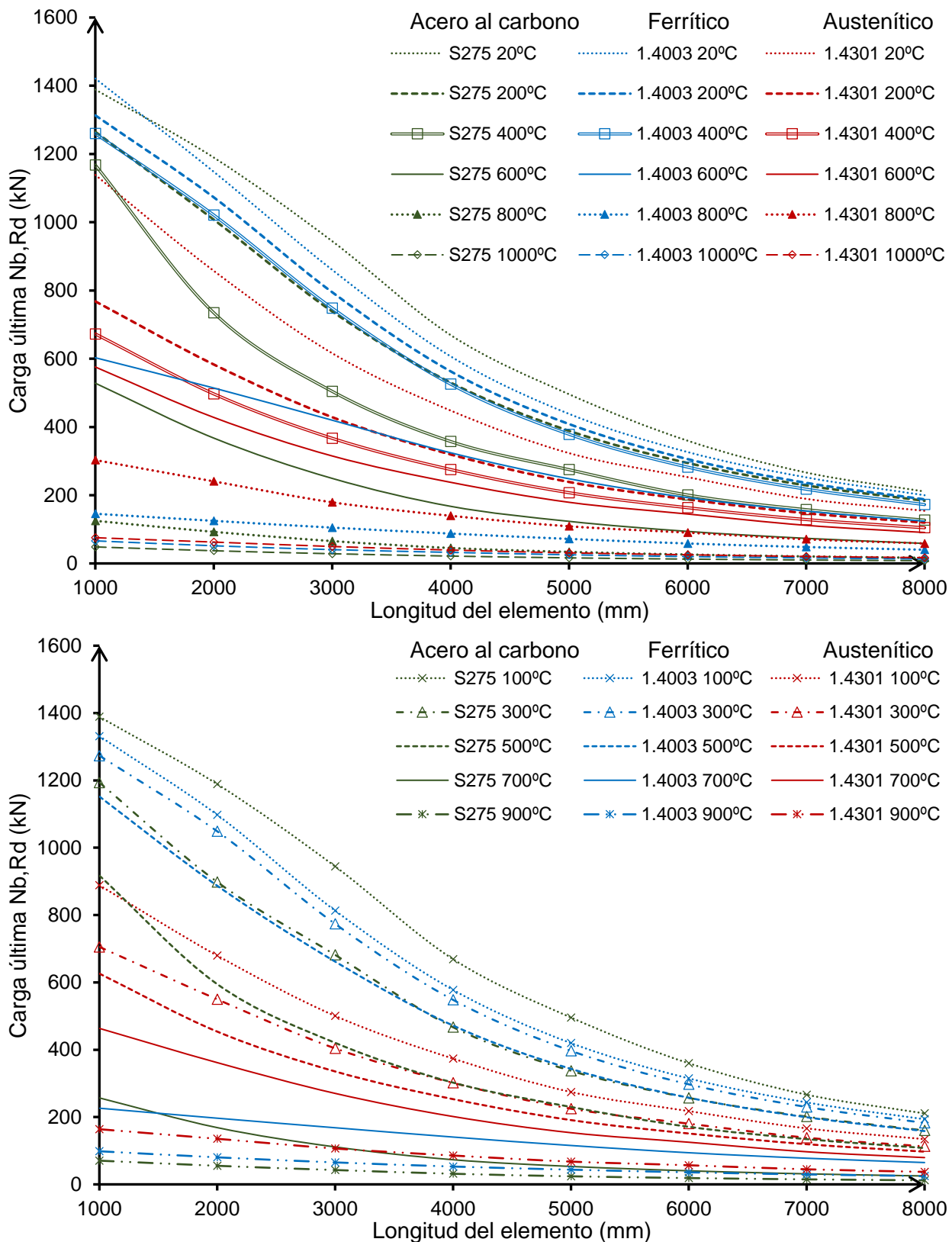


Figura 5.7 Resistencia última de pilares entre uno y ocho metros de longitud empleando diferentes materiales y a temperaturas elevadas

Tabla 5.4 Diferencia porcentual de la resistencia última del pilar, empleando aceros inoxidables respecto al acero al carbono S275

Temperatura °C	Austenítico 1.4301	Ferrítico 1.4003
20	-29%	-6%
100	-41%	-11%
200	-39%	5%
300	-35%	14%
400	-26%	37%
500	-18%	48%
600	37%	80%
700	168%	88%
800	207%	90%
900	174%	73%
1000	85%	51%
Media	43.97%	42.63%

En la Tabla 5.4 se resume en porcentaje la diferencia en carga última entre el inoxidable y el acero al carbono.

5.2 Verificación en el dominio del tiempo

Los resultados se presentan sin considerar el efecto de sombra explicado en el apartado 2.6.4. Para ver los resultados considerando dicho efecto consultar el ANEJO E.

5.2.1 Velocidad y aceleración de deformación

Definir tiempo resistencia del pilar en el análisis térmico requiere observar el momento en el que el desplazamiento en un punto de la estructura se vuelva excesivamente grande y aumente de manera súbita como ocurriría al pandear. Este punto representa el momento en el que el pilar colapsa y se obtienen grandes desplazamientos. Dicho momento no puede determinarse mediante el campo de temperaturas y se decide determinarlo mediante el análisis de la velocidad y aceleración de deformación del nodo del apoyo libre y el nodo central del pilar. Se presenta el resultado empleando el acero austenítico 1.4301 como referencia.

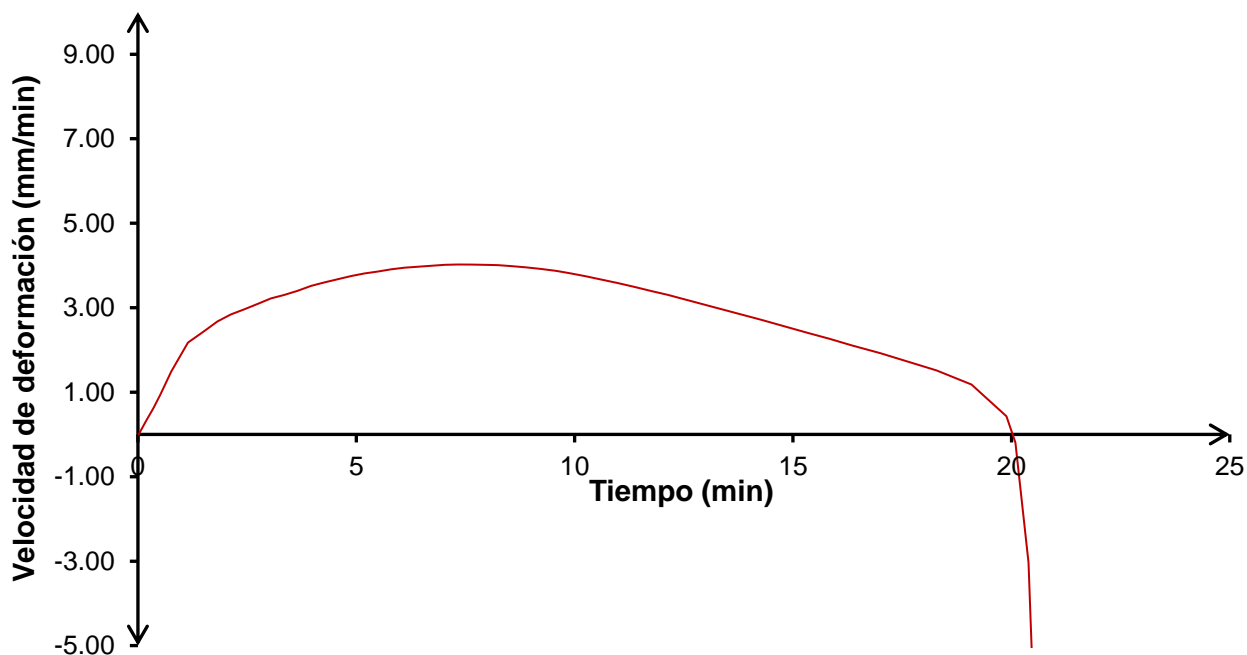


Figura 5.8 Velocidad de deformación del apoyo libre, empleando acero austenítico 1.4301 con un coeficiente de utilización 0.4

Puesto que el nodo del apoyo libre se está dilatando libremente, al momento en el que ocurre el colapso, dicho nodo desciende repentinamente cambiando la dirección del desplazamiento y volviendo la velocidad de deformación cero en ese instante tal y como se observa en la Figura 5.8. Puede observarse también como la aceleración de la deformación cambia repentinamente en dicho momento, por lo que haciendo uso de lo anterior se logra definir el tiempo resistente del pilar y la temperatura que alcanza en ese instante.

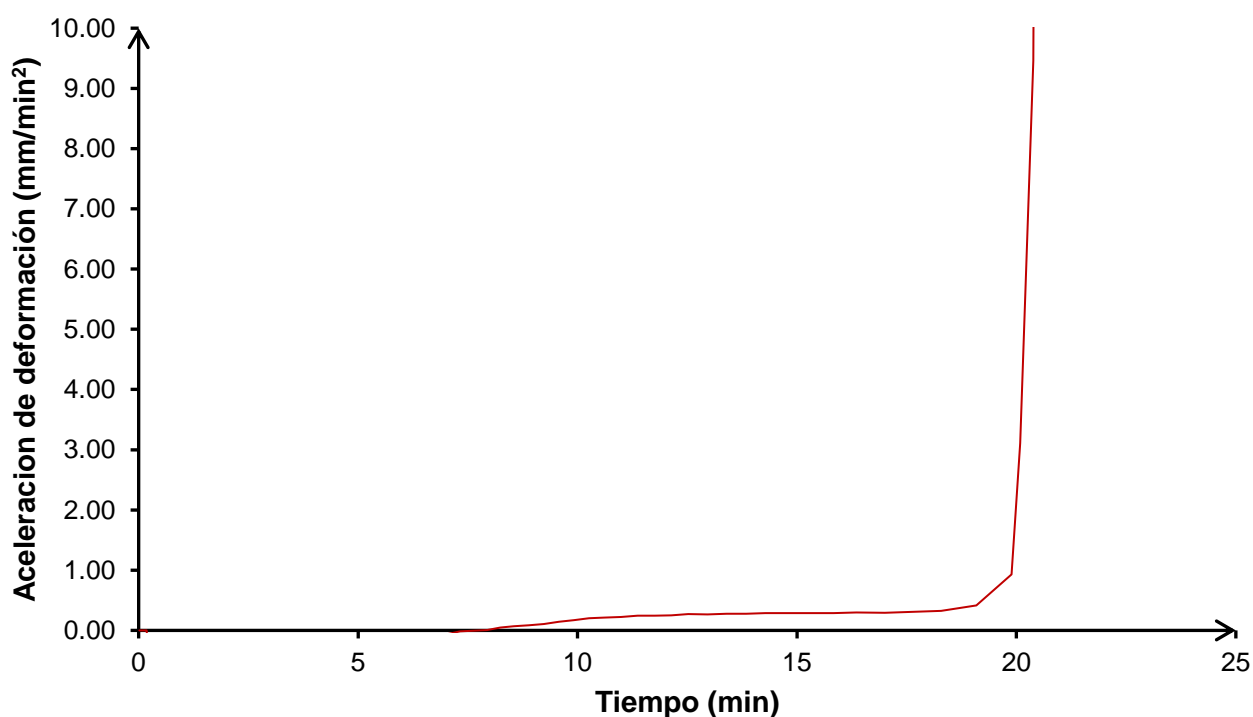


Figura 5.9 Aceleración de deformación del apoyo libre, empleando acero austenítico 1.4301 con coeficiente de utilización 0.4

5.2.2 Comparación de tiempo resistente al fuego del pilar, empleando acero inoxidable y empleando acero al carbono

Dado que el análisis se realizó considerando diferentes coeficientes de utilización, se puede comparar para el mismo grado de utilización inicial las temperaturas máximas que soporta el elemento sometido al incendio de la curva nominal de EN 1991-1-2, tal como se muestra en la Figura 5.10.

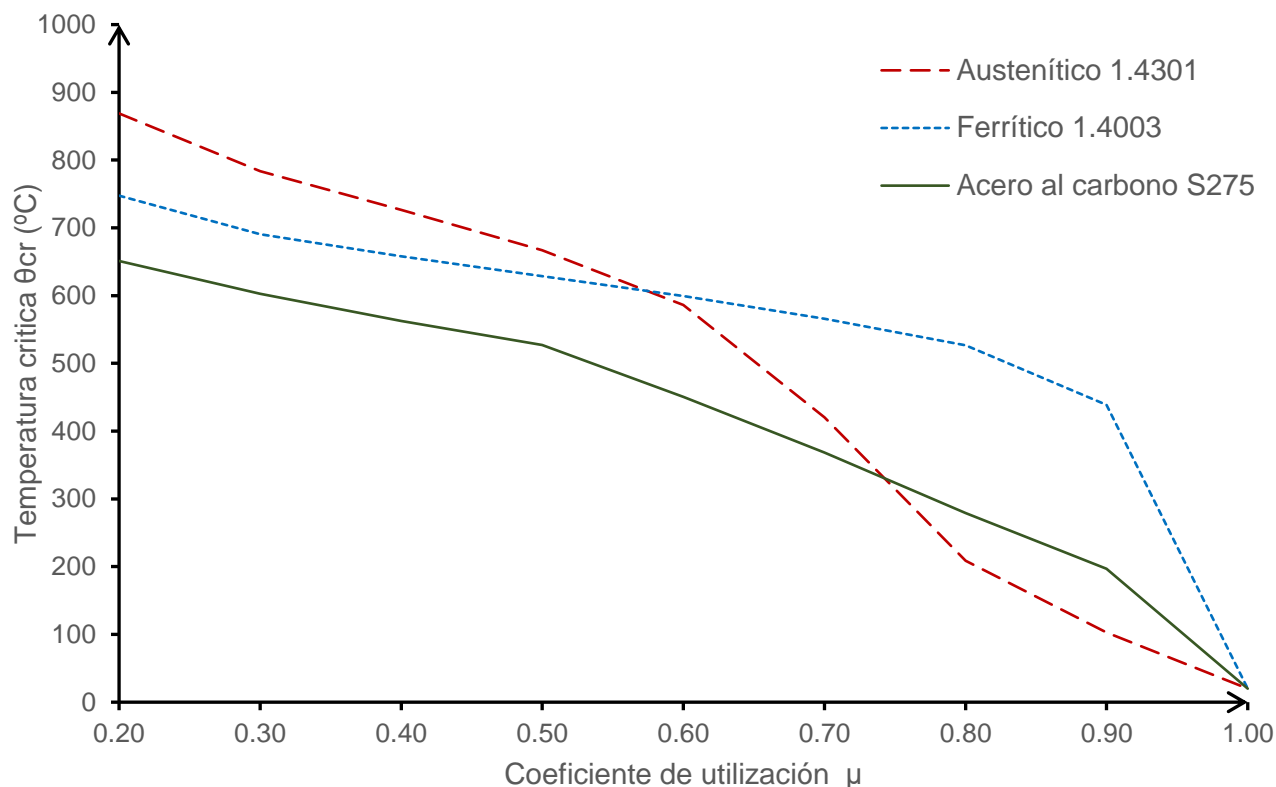


Figura 5.10 Temperatura crítica de pilar analizado en situación de incendio a diferentes grados de utilización.

Puede parecer intuitivo pensar que bajo un mismo grado de utilización inicial el material con temperatura crítica mayor sea el que mejor se comporte ante el incendio. Dicha conclusión no es tan directa puesto que el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura es diferente. La Figura 5.11 muestra el tiempo de resistencia a fuego del pilar analizado, en función del grado de utilización.

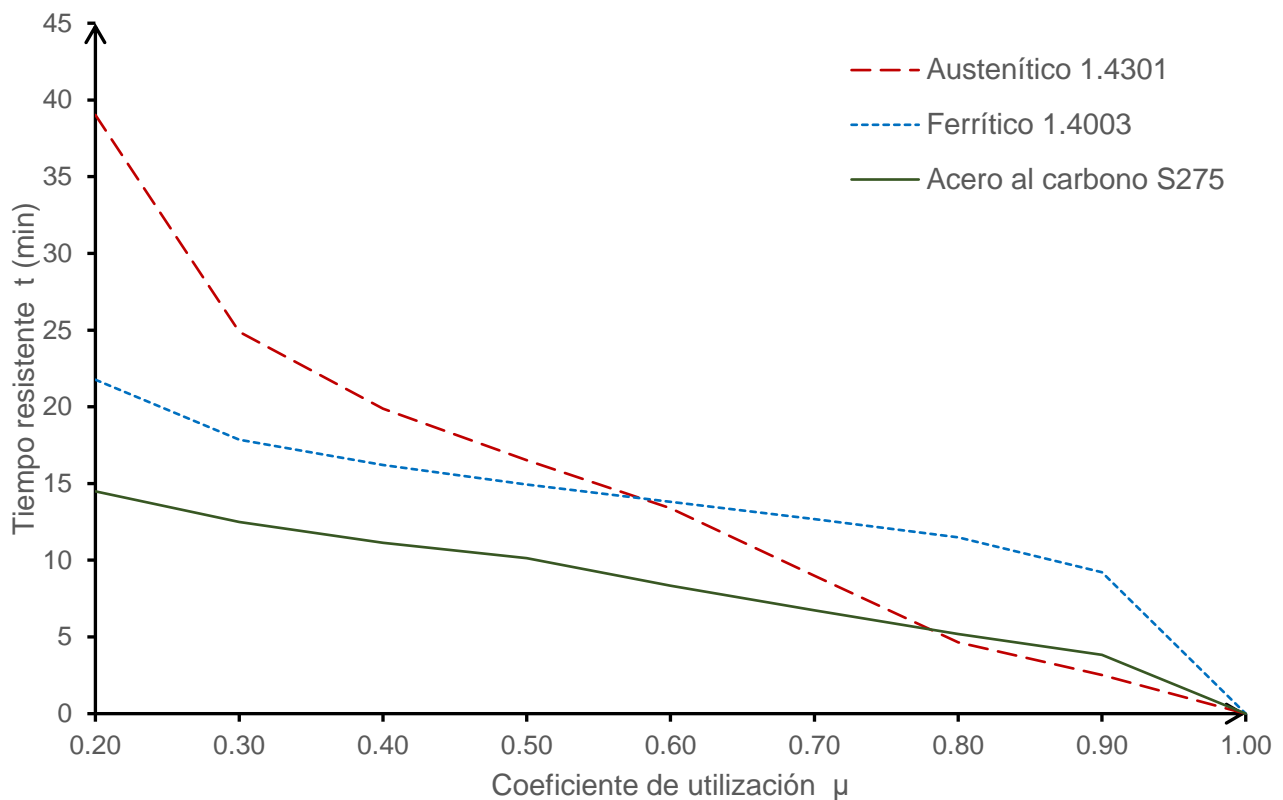


Figura 5.11 Tiempo de resistencia al fuego del pilar analizado en situación de incendio a diferentes grados de utilización.

Relacionando las gráficas de la Figura 5.10 y Figura 5.11 se puede obtener el tiempo resistente según la temperatura crítica (ver Figura 5.12).

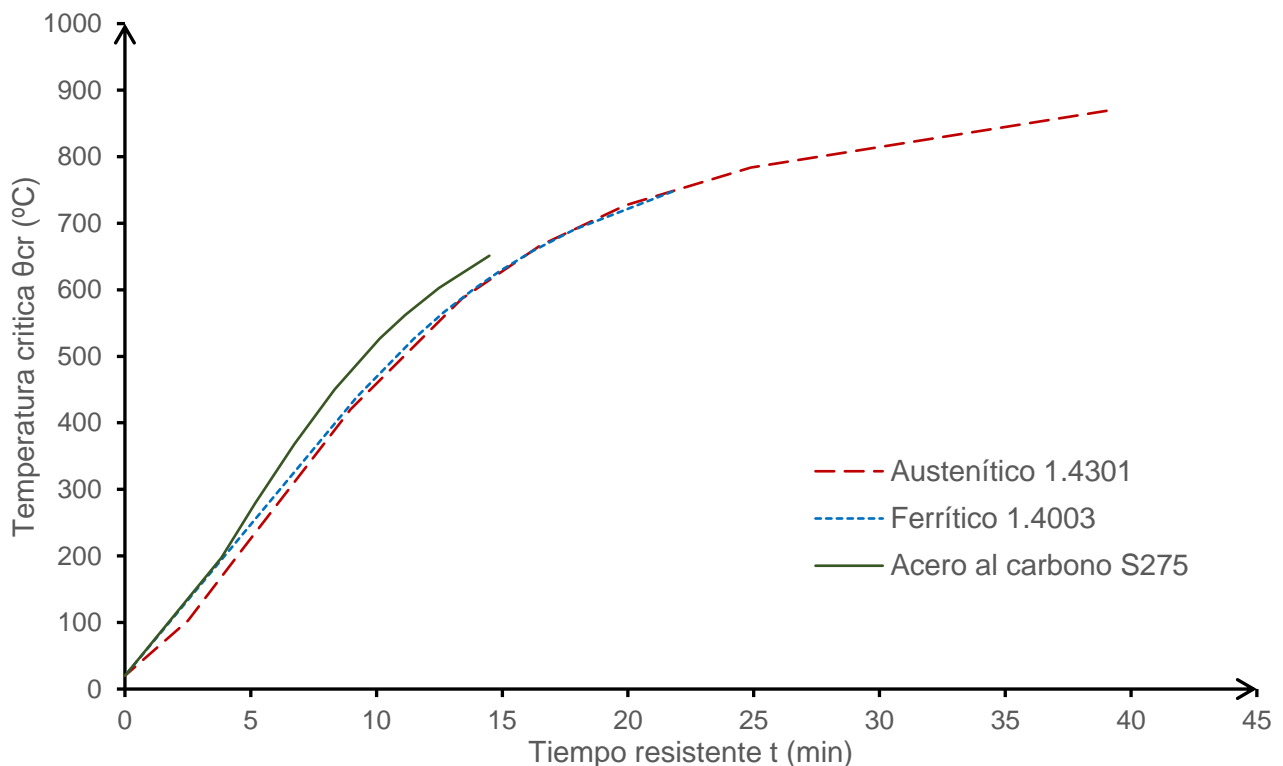


Figura 5.12 Tiempo resistente al fuego del pilar analizado en situación de incendio, según la temperatura crítica.

En cualquiera de las gráficas presentadas es notable la superioridad del acero inoxidable como material de elección en situación de incendio, pero la más representativa es la Figura 5.11 donde se observa que, para un mismo coeficiente de utilización, empleando el acero austenítico 1.4301 o ferrítico 1.4003, el pilar resiste más tiempo en el incendio que utilizando acero al carbono. Usando acero inoxidable se obtiene una media de 6.44 minutos más de resistencia que usando acero al carbono. Aunque el acero al carbono para grados de utilización mayores a 0.78 es mejor que el austenítico, no es un porcentaje de carga habitual al que se encuentra sometida una estructura. También puede verse en la Figura 5.12 que para cualquier temperatura crítica los aceros inoxidables tienen mayor tiempo de resistencia al fuego. Este resultado se debe no sólo a la mejor resistencia media a temperaturas elevadas de los aceros inoxidables, sino también al hecho de cuán rápido incrementa su temperatura un material, considerando las formas de transferencia de calor. El primer factor a considerar es el calor específico que expresa cuánta energía es necesaria para elevar una cantidad de masa 1°C, por lo que al ser mayor la del acero al carbono tardaría más en calentarse; sin embargo, su conductividad térmica es mayor que la del acero al carbono y transmite esa energía más rápido a todas las partes del elemento. Además, la energía absorbida por radiación es superior por su mayor coeficiente de emisividad respecto al acero inoxidable. Estos factores hacen que el acero al carbono eleve su temperatura más rápido y falle antes. La Tabla 5.5 resume la comparativa entre materiales.

Tabla 5.5 Comparación de aceros inoxidables respecto al acero al carbono S275

Material	Variación media (Tiempo)	Aumento medio en tiempo resistente (min)	Aumento medio en temperatura crítica (°C)
Austenítico 1.4301	57.41%	7.19	90.75
Ferrítico 1.4003	75.25%	5.70	152.16

5.2.3 Comparación de la normativa EN 1993-1-2 con los resultados numéricos

Obtener los resultados anteriores de forma analítica implica la resolución de la ecuación (2.12) en forma de serie para cualquier tiempo $t = n\Delta t$, pero antes es necesario obtener la temperatura crítica del elemento para luego encontrar el tiempo necesario para alcanzarla. La temperatura crítica según EN 1993-1-2 se halla con la ecuación (5.2), pero esta no es válida cuando se considera criterios de deformación o de inestabilidad como es el caso de este estudio.

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674\mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (5.2)$$

Puesto que el uso de la ecuación (5.2) no es apropiado para encontrar la temperatura crítica, se debe recurrir a un proceso iterativo utilizando las curvas de pandeo para incendio, hasta encontrar la temperatura que resiste el pilar bajo el esfuerzo actuante. Para visualizarlo, se extrajeron del análisis en el dominio de la resistencia y empleando acero austenítico como referencia, las gráficas carga-desplazamiento del pilar analizado a diferentes temperaturas, pero con las ordenadas normalizadas con la resistencia última a 20°C, tal y como se muestra en la Figura 5.13 (ver ANEJO E para acero ferrítico y acero al carbono). Observando el coeficiente de utilización, se puede estimar la temperatura crítica; es importante notar que con este método se pierde información, pues la razón de decaimiento de la temperatura crítica respecto al aumento del coeficiente de utilización obtenidos

de un análisis mecánico, no es el mismo que el obtenido de la Figura 5.10, llevando generalmente a resultados conservadores.

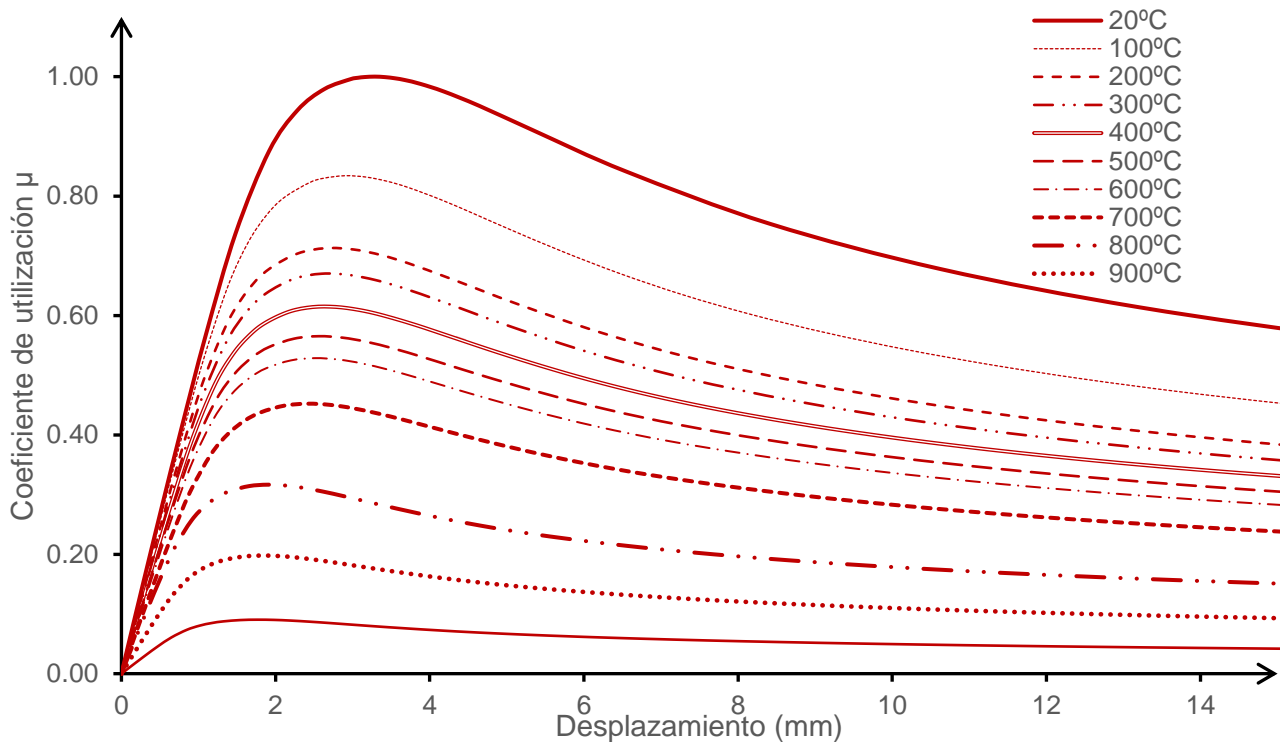


Figura 5.13 Diagrama Carga(normalizada)-desplazamiento para austenítico 1.4301 a diferentes temperaturas, extraídas de análisis NLGM en modelo numérico

Ingresando luego la temperatura crítica en la Figura 5.14, Figura 5.15 o Figura 5.16 según el material, se puede obtener en función del coeficiente de forma el tiempo que resiste la estructura.

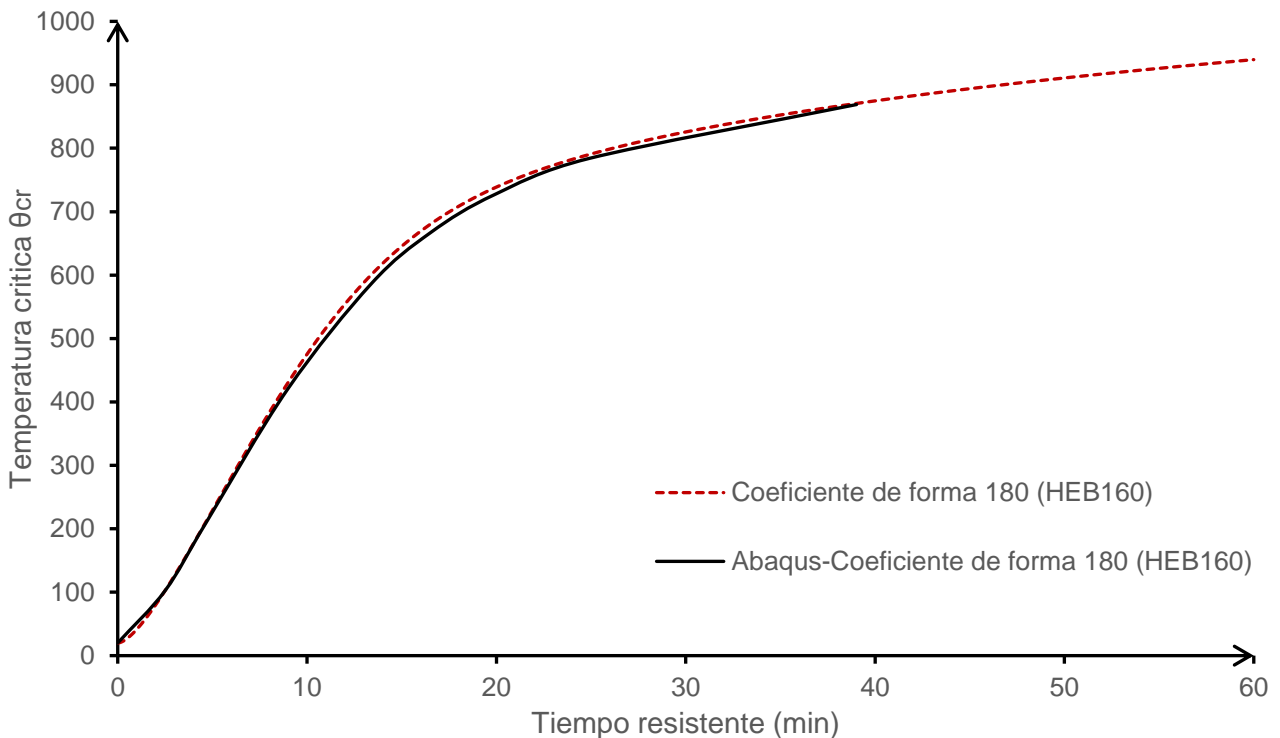


Figura 5.14 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero austenítico 1.4301 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico

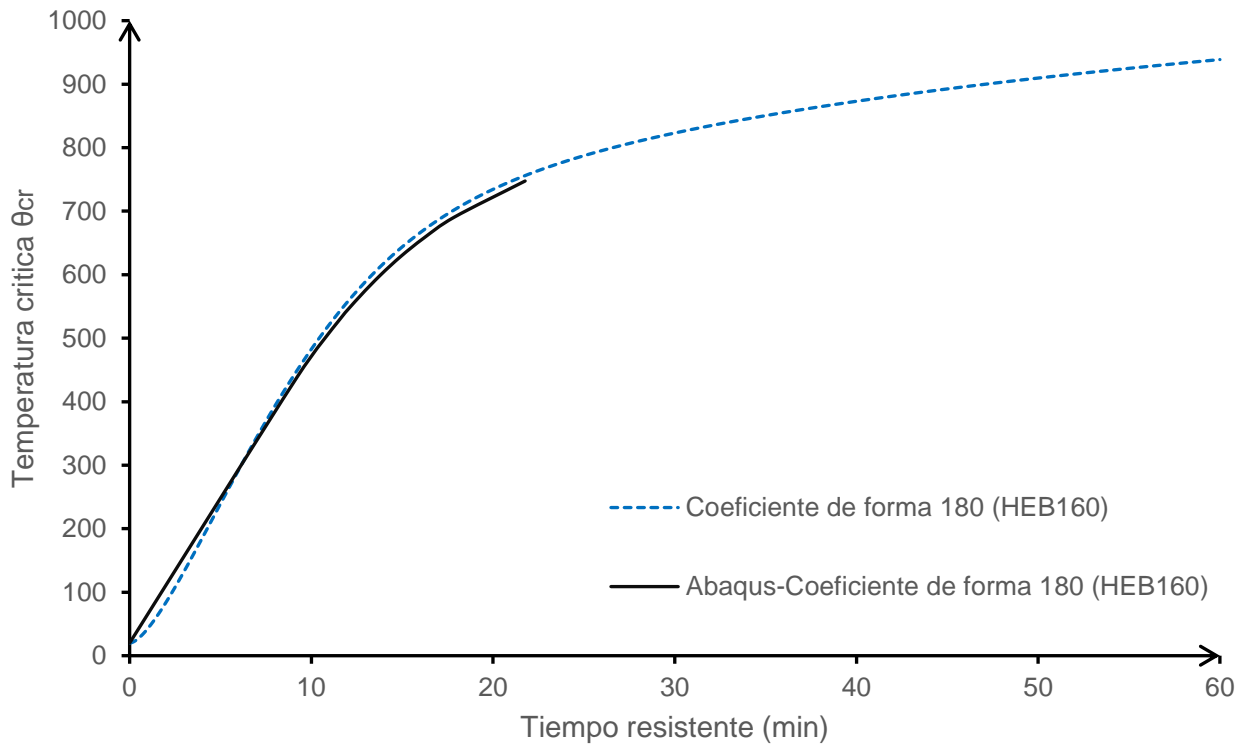


Figura 5.15 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero ferrítico 1.4003 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico

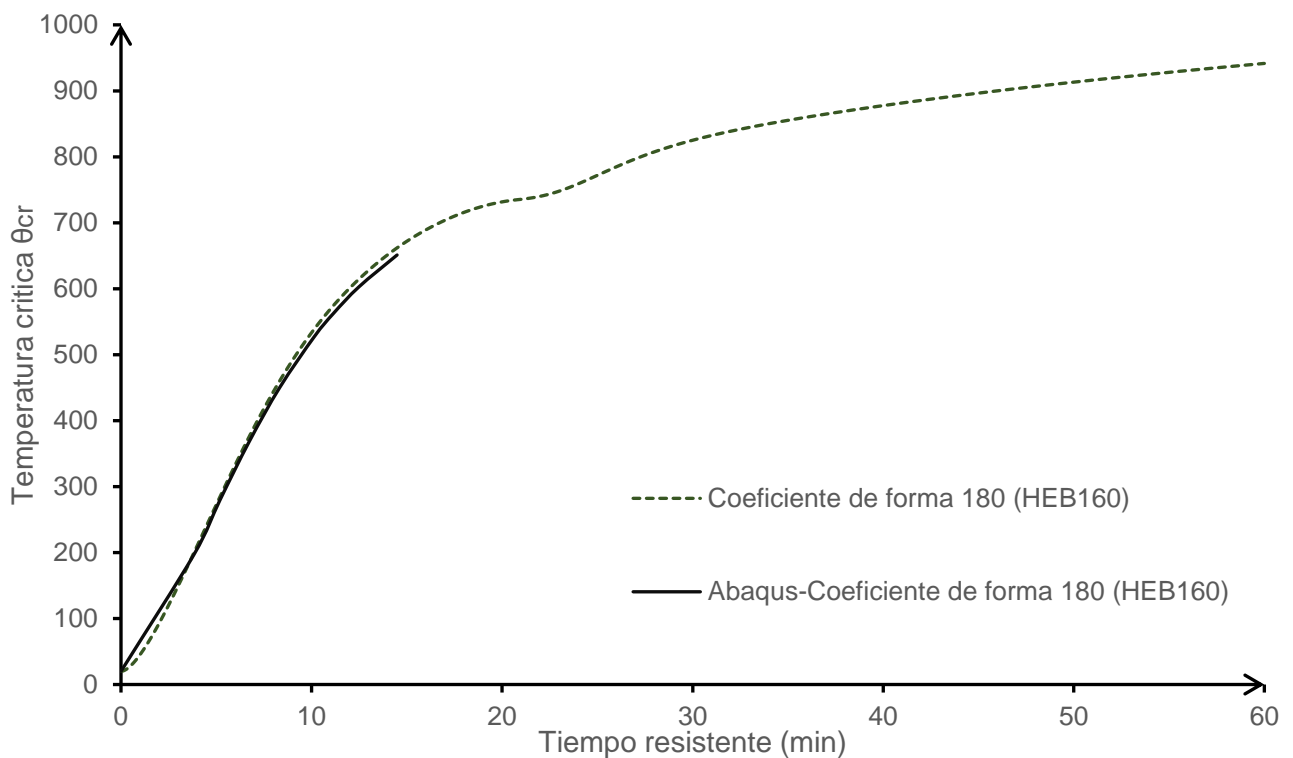


Figura 5.16 Tiempo resistente al fuego en función de la temperatura crítica para acero al carbono según EN 1993-1-2 y según modelo numérico

En todas las gráficas de todos los materiales puede observarse que las predicciones de la función analítica en general son conservadoras, pues para una misma temperatura crítica obtiene tiempos menores que el modelo numérico (ver Tabla 5.6). Esta diferencia radica en parte en la hipótesis de temperatura homogénea en todo el elemento Figura 5.17 (b), situación que difiere de la mostrada por el modelo numérico, tal como se muestra en la Figura 5.17 (a). Aún si el campo de temperaturas es homogéneo alrededor del pilar, las diferencias de espesor entre alma y las alas, además de la zona de unión entre ambas, hacen que la distribución de temperaturas en todo el elemento no sea homogénea. Debido a esto, los resultados del modelo numérico son un poco más optimistas que los resultados de la ecuación analítica (2.12).

(a) Distribución de temperatura en modelo numérico (b) Hipótesis de distribución de temperatura homogénea

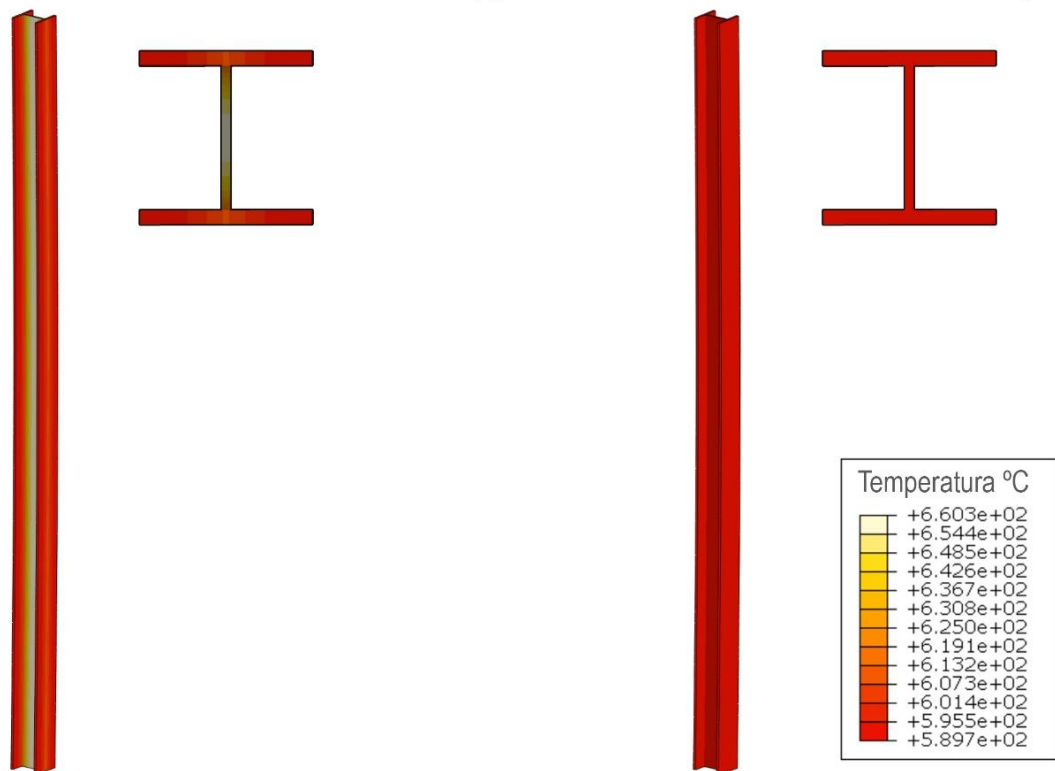


Figura 5.17 Distribución de temperaturas en un elemento sometido a un campo de temperatura homogéneo en todas sus caras

En la Tabla 5.6 se resumen las variaciones entre la normativa vigente y el modelo numérico.

Tabla 5.6 Comparación entre formulación analítica y resultados del modelo numérico

Material	Variación media (Tiempo)	Diferencia media en tiempo (min)
Austenítico 1.4301	2.46%	0.42
Ferrítico 1.4003	3.42%	0.51
Acero al Carbono S275	2.58%	0.25

5.3 Propuesta de mejora de fiabilidad del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)

A la vista de los datos mostrados del análisis en el dominio de la resistencia empleando acero austenítico y ferrítico, se propone una solución a los problemas de fiabilidad presentados en los apartados 5.1.2 y 5.1.3. Se propone nuevos valores de los coeficientes α_0 y β de la Tabla 3.8, aplicable al caso de pilares de acero inoxidable austenítico y ferrítico, para ajustar mejor la ecuación (5.3) a los resultados numéricos.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{\phi_0^2 - \beta \bar{\lambda}_0^2}} \leq 1 \quad (5.3)$$

$$\phi_0 = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \beta \bar{\lambda}_0^2 \right] \quad \text{donde } \alpha = \alpha_0 / \xi_0 \quad (5.4)$$

5.3.1 Metodología

Considérese el conjunto de puntos de la Figura 5.18, se puede encontrar una función de forma conocida que prediga la información entre puntos reduciendo al mínimo la diferencia entre esta y los datos proporcionados (no es aconsejable ni razonable hacer que la función de aproximación pase exactamente por los puntos dados).

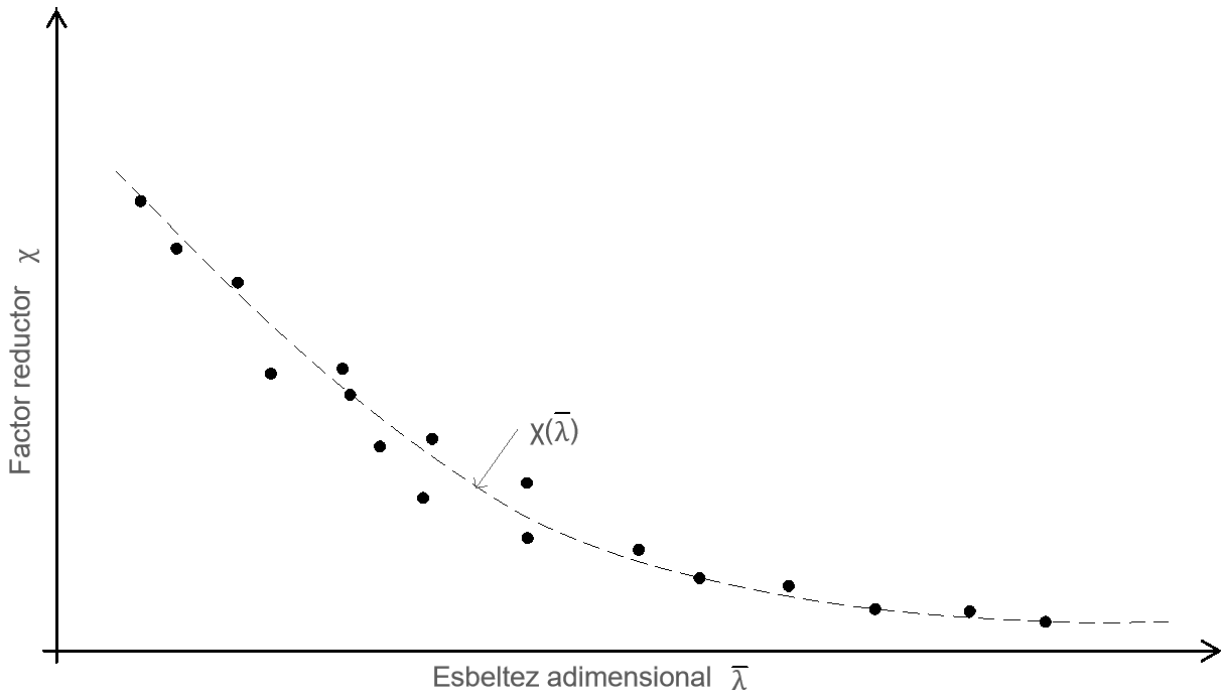


Figura 5.18 Aproximación funcional de un conjunto discreto de datos

Teniendo la información del conjunto de datos $(\bar{\lambda}_i, \chi_i)$ en este caso obtenidos por medio de un modelo numérico (FEM), se pueden encontrar coeficientes dentro de la función $\chi(\bar{\lambda})$ que minimicen la distancia entre la función y los puntos dados.

$$E_1 = \sum_{i=1}^n |\chi_i - \chi(\bar{\lambda})| \quad (5.5)$$

Para hallar la mejor solución y encontrar los valores mínimos para los coeficientes α_0 y β se debe encontrar las derivadas parciales de la ecuación (5.5), igualarlas a cero y resolver el sistema de ecuaciones resultantes. El problema radica en que la función (5.5) conocida como desviación absoluta, no es derivable en cero debido a su valor absoluto y no necesariamente se obtiene la solución del sistema de ecuaciones resultantes [19]. Para resolver este inconveniente, modificamos la ecuación obviando el valor absoluto y sustituyéndolo por el cuadrado de su contenido (ver ecuación (5.6)).

$$E_2 = \sum_{i=1}^n (\chi_i - \chi(\bar{\lambda}))^2 \quad (5.6)$$

Minimizar la expresión (5.6) por medio de las derivadas parciales es el método conocido como mínimos cuadrados. El problema de este método es que aproximadamente el 50% de los datos quedan por encima de la función, y por tanto su aplicación en este estudio se limitará al cálculo de la tendencia de los resultados, la propia tendencia de la propuesta y la función de probabilidad acumulada. La función de probabilidad acumulada se definirá como la probabilidad de que la muestra analizada tome valores menores a la variable de juicio J_i definida en la ecuación (5.7).

$$J_i = \frac{\text{Respuesta del modelo numérico}}{\text{Respuesta de la ecuación analítica}} \quad (\text{variable de juicio}) \quad (5.7)$$

5.3.2 Nueva propuesta para acero austenítico y ferrítico

Se presenta una primera aproximación de valores para α_0 y β en los aceros inoxidables, obtenidos de manera no rigurosa y mediante métodos iterativos para conseguir una fiabilidad del 95%; la forma más acertada de conseguir dichos valores se debería realizar siguiendo el método presentado en EN 1990 [20] (ver graficas resultantes en ANEJO D).

Cambiando los valores de α_0 y β para austenítico a 1.10 y 1.75 respectivamente de la Tabla 3.8 en el eje menor, se consigue establecer que el 95% de los puntos analizados a todas las temperaturas de estudio se encuentren en la zona segura y con una desviación típica de 0.03194 en los valores de χ . Estos datos se confirman en la Figura 5.19 donde la línea de tendencia conseguida por una aproximación funcional de mínimos cuadrados de la nueva propuesta, siempre se encuentra por debajo de la tendencia de los valores del modelo numérico y con la desviación tipo establecida. Aunque α_0 sea mayor a la unidad en esta propuesta, el valor de α real como coeficiente de imperfección siempre será menor a uno dada la influencia del factor $\xi_\theta = \sqrt{k_{2,\theta}/k_{E,\theta}}$.

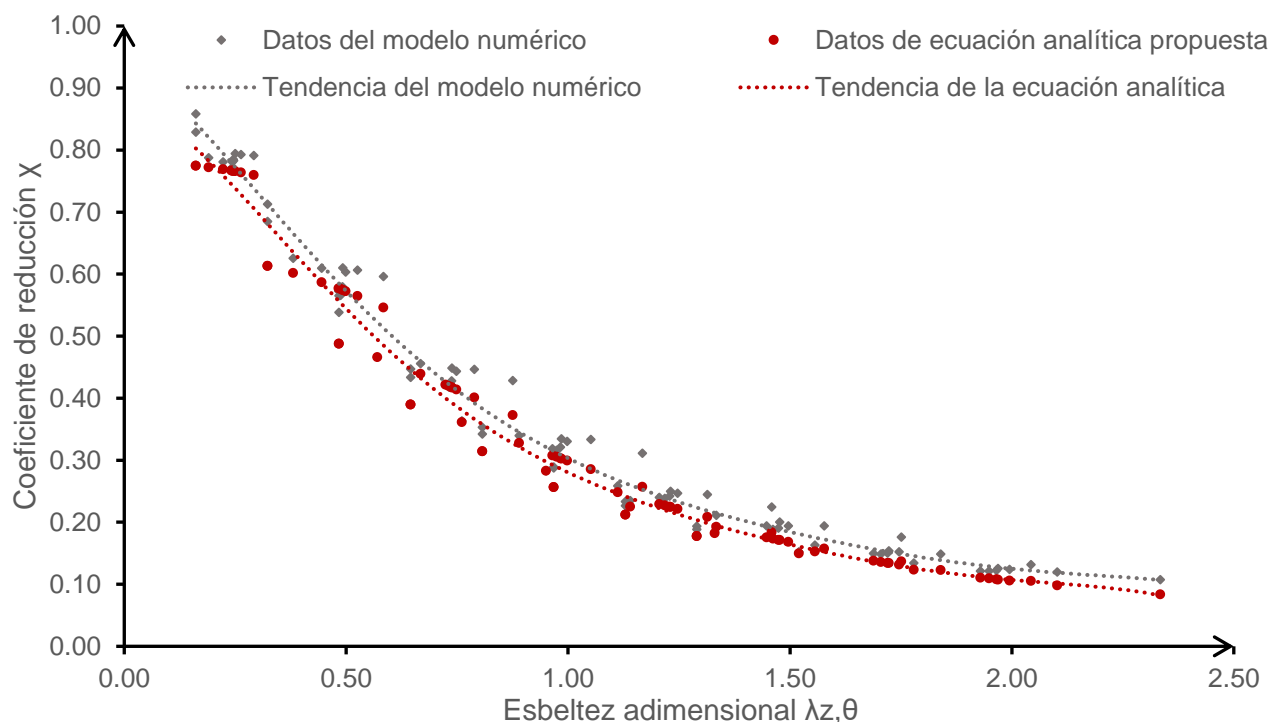


Figura 5.19 Nueva propuesta para el coeficiente de reducción χ por pandeo, para acero inoxidable austenítico (en rojo) ($\alpha_0=1.1$ y $\beta=1.75$)

Graficando la función de probabilidad acumulada en función de la variable de juicio definida en la ecuación (5.7), se observa que existe un 5% de probabilidad de encontrar valores de $J_i < 1$ en el acero austenítico, es decir, un 95% de los datos de la nueva propuesta serán menores que los datos del modelo numérico. La Figura 5.20 muestra la probabilidad acumulada de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión).

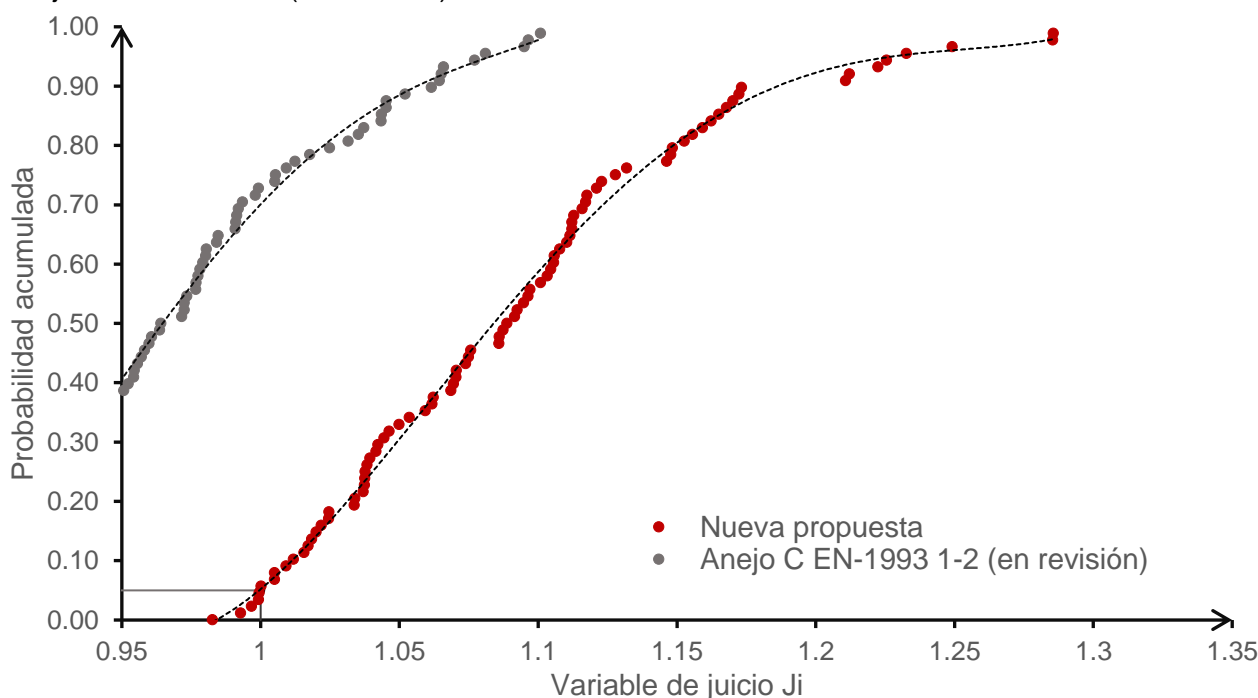


Figura 5.20 Probabilidad acumulada en función de la variable de juicio, de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 para acero austenítico

La problemática en el acero ferrítico se encontraba para esbelteces pequeñas en la zona inicial de la curva, por lo que respecto a los datos de la Tabla 3.8 el aumento del valor de α_0 a 0.85 ajusta mejor la gráfica y un pequeño aumento en el valor de β a 1.55 corrige los valores a temperaturas elevadas. El resultado obtenido es la curva de la Figura 5.21 con un 95% de los valores por debajo del modelo numérico, tal como se observa en la comparación de las líneas de aproximación funcional y con una desviación típica de 0.06844 para los valores de χ .

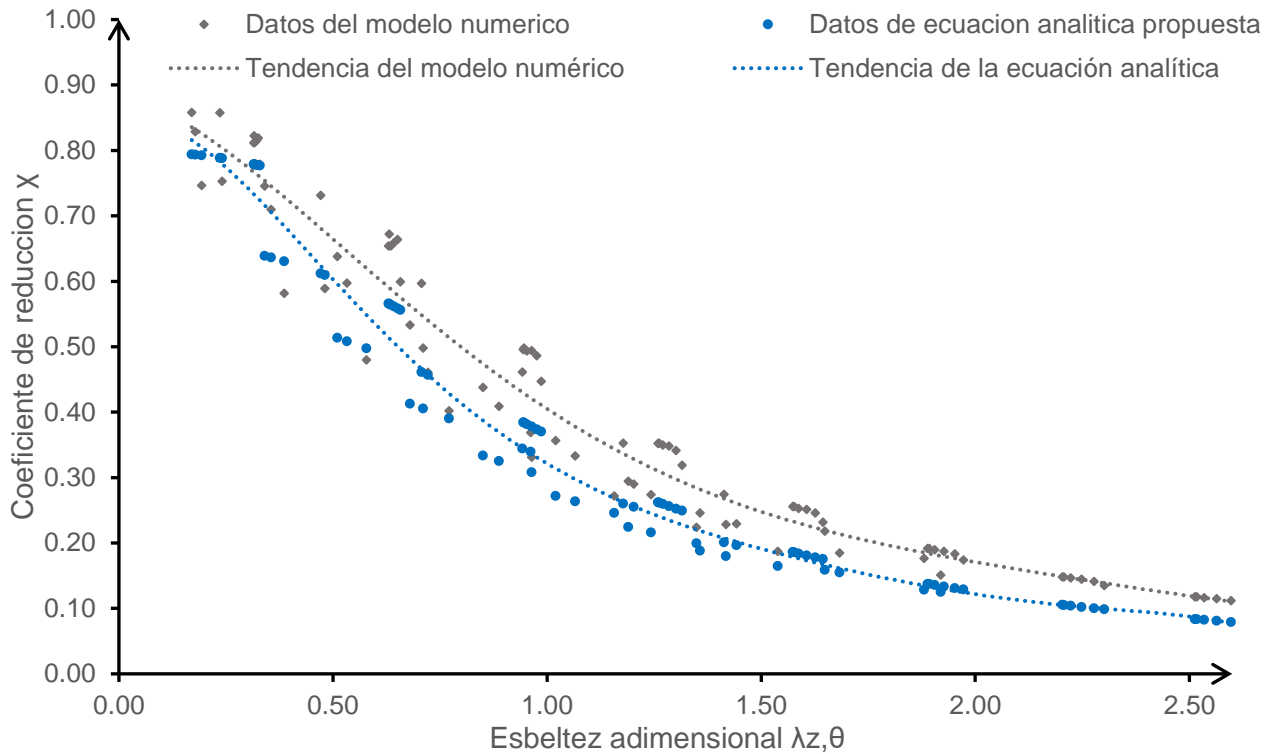


Figura 5.21 Nueva propuesta para el coeficiente de reducción χ por pandeo, para acero inoxidable ferrítico (en azul) ($\alpha_0=0.85$ y $\beta=1.55$)

Graficando la función de probabilidad acumulada en función de la variable de juicio, se observa que existe un 5% de probabilidad de encontrar valores de $J_i < 1$ en el acero ferrítico. La Figura 5.22 muestra la probabilidad acumulada de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión).

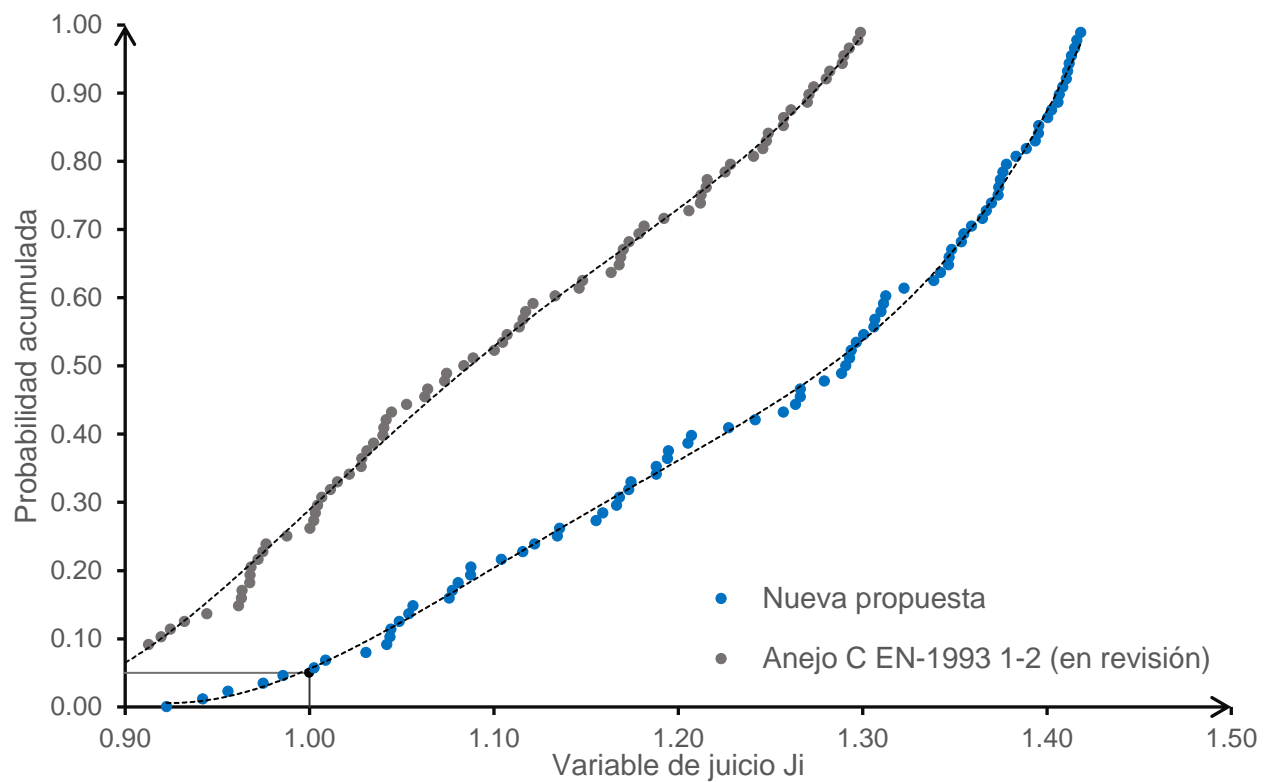


Figura 5.22 Probabilidad acumulada en función de la variable de juicio, de la nueva propuesta y el Anejo C EN 1993-1-2 para acero ferrítico

CAPÍTULO VI. Conclusiones

El acero inoxidable, debido a sus buenas propiedades mecánicas y valor residual, es un material que está siendo utilizado actualmente en la construcción. El aumento de su uso está relacionado con la creciente conciencia acerca de las ventajas que proporciona. Para hacer este empleo más factible y eficiente, es necesario desarrollar una normativa que reproduzca el potencial y las bondades que el acero inoxidable posee frente al acero al carbono. Los códigos de diseño estructural vigentes cubren en parte estos aspectos y están basados en gran medida bajo la asunción de un comportamiento análogo del acero inoxidable al acero al carbono. Pueda ser razonable tratar de adaptar las normativas de ambos materiales, ya que ambos tienen como elemento principal el hierro (Fe), lo cual pudo ser ventajoso en un inicio como transición del acero al carbono al inoxidable en términos de adaptación al código para el proyectista. No obstante, en la actualidad, con un mejor entendimiento y análisis es necesario marcar la divergencia en el tratamiento de ambos materiales.

Asumiendo los resultados del modelo numérico como representativo de la realidad en este estudio, se concluye la existencia de una cierta incompatibilidad de la formulación analítica vigente con el comportamiento real del acero inoxidable en situación de incendio, por lo que se decidió seguir el estudio con un modelo analítico aun sin vigencia que se encuentra en el Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión), pero que predice mejor la conducta del acero inoxidable en su exposición al fuego. Este modelo describe el comportamiento de tensión- deformación del acero inoxidable basado en el modelo de Ramberg-Osgood compuesto en dos etapas con buenas predicciones de la conducta real observada del material. Además, se considera la influencia de la reducción de las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas mediante el factor de imperfección $\alpha = \alpha_0 / \xi_0$, y se incorpora un nuevo coeficiente β que ayuda a ajustar mejor la forma de las curvas de pandeo. Los resultados mostraron buenas aproximaciones del método analítico para predecir la respuesta del modelo numérico, pero con un porcentaje no aceptable de inseguridad. Ajustando los valores de estos dos parámetros a $\alpha_0 = 1.10$ y $\beta = 1.75$ para acero austenítico y $\alpha_0 = 0.85$ y $\beta = 1.55$ para acero ferrítico se corrige esta situación. En el dominio del tiempo la norma vigente muestra resultados conservadores y muy cercanos a los resultados numéricos, con una variación media entre los tres materiales del 2.81%, aunque esta puede reducirse si se considera el efecto sombra.

En la comparación entre materiales, mediante el análisis realizado en el dominio de la resistencia, se ha demostrado que el acero inoxidable tiene mejores propiedades resistentes a elevadas temperaturas que el acero al carbono. El acero austenítico tuvo una media superior de resistencia sobre el acero al carbono del 43.97% y el acero ferrítico sobre el acero al carbono del 42.63%, con un promedio entre los dos del 43.30%, si se empleara acero inoxidable genérico en la comprobación a incendio. Del análisis en el dominio del tiempo el acero inoxidable presenta mejores resultados que el acero al carbono con una media superior en tiempo resistente de 57.41% utilizando acero austenítico y 75.25% utilizando ferrítico, con un promedio entre ambos del 66.32% empleando acero inoxidable en la verificación en el tiempo. Esta ventaja del acero inoxidable, ayuda a salvaguardar las vidas humanas al aumentar considerablemente el tiempo de evacuación ante un incendio en estructuras metálicas. Además, podría según el caso, reducir o incluso eliminar la necesidad de recubrimientos contra el fuego aplicados a los elementos estructurales, respecto al acero al carbono.

Perspectivas futuras

En base a los resultados obtenidos de este análisis, se propone para futuros estudios:

- Extender el estudio de resistencia a fuego de pilares de acero inoxidable, a diferentes tipos de sección transversal y distintos grados de acero inoxidable, ya que de las categorías mencionadas se emplearon sólo el Austenítico I y Ferrítico II.
- Determinación más precisa, de acuerdo con criterios estadísticos, de los valores α_0 y β , según lo especificado en el Anejo D de EN 1990, con factores de seguridad asociados para propósitos de diseño estructural.
- Realizar el estudio paramétrico empleando elementos finitos sólidos en los que se pueda reproducir la radiación en una cavidad y poder evaluar su efecto según la forma del elemento.
- Corrección de la aplicación del factor k_{sh} del efecto de sombra en EN 1993-1-2, aplicándose únicamente en la transmisión de calor por radiación como una reducción de la emisividad, y no al flujo de calor total.
- Realizar estudios experimentales de las curvas tensión-deformación del acero inoxidable a diferentes temperaturas.
- Corrección del coeficiente de imperfección $\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ en situación de incendio para acero al carbono, para mejorar la fiabilidad de las curvas de pandeo. Ajustando el valor con criterios estadísticos, o haciendo dependiente el coeficiente de imperfección de la temperatura mediante el factor $\xi_\theta = \sqrt{k_{2,\theta}/k_{E,\theta}}$.

Bibliografía y referencias

- [1] EN1993-1-4, "*Eurocode 3: Design of steel structures: General rules- Supplementary rules for stainless steels*", Bruselas: CEN, 2006.
- [2] EN1993-1-1, "*Eurocode 3: Design of steel structures: General rules and rules for buildings*", Bruselas: CEN, 2005.
- [3] EN1991-1-2, "*Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire*", Brussels: CEN, 2002.
- [4] EN1993-1-2, "*Eurocode 3: Design of steel structures: General rules- Structural fire design*", Bruselas: CEN, 2005.
- [5] E. M. Arrizabalaga y et-al, "EAE Instruccion de acero estructural", 3 ed., Gobierno de España, Ministerio de Fomento, 2012.
- [6] M. B. D. N. L. G. N.S. Trahair, "The behaviour and design of steel structures to EC3", 4th ed., Oxford: Taylor & Francis, 2010.
- [7] R. D. Ziemian, "Guide to stability design criteria for metal structures", 6th ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [8] J. C. McCormac y S. F. Csernak, "Structural Steel Design", 5th ed., Pearson, Ed., Prentice Hall, 2011.
- [9] M. G. Lorenzo, "Acero", Fondo de Cultura Economica, 2003.
- [10] B. Nancy y et-al, "Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural", Cuarta ed., 2017.
- [11] R. O. Lopez, H. A. Corrales y H. P. L., «"Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles",» *Scientia et technica*, pp. 273-278, Mayo 2007.
- [12] D. L. Olson, «"Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties",» New York, 1985.
- [13] W. Ramberg y W. R.Osgood, «"Description of stress-strain curves by three parameters",» National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1943.
- [14] EN1993-1-2, «Annex C (Normative) Stainles steel,» de "*Eurocode 3: Design of steel structures: General rules- Structural fire design*", Bruselas, CEN, (to be published).
- [15] P. J. Frey y P. L. George, "Mesh Generation- application to finite elements", Oxford: Hermes Science, 2000.
- [16] G. F. Carey y J. T. Oden, "Finite Elements- computational Aspects", vol. III, S. Ingerman, Ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1984.
- [17] O. Zienkiewicz, R.L.Taylor y D. Fox, "The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics", 7th ed., Elsevier, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [18] M. A. Crisfield, «"A fast incremental/iterative solution procedure that handles snap-through",» *Computers & Structures*, vol. 13, pp. 55-62, 1981.
- [19] R. L. Burden y J. D. Faires, "Análisis Numérico", 7a. ed., T. Learning, Ed., Ciudad de México, 2003.
- [20] EN1990, "Eurocódigo 0: bases de cálculo de estructuras", Bruselas: CEN, 2002.

- [21] Y. A. Çengel y M. A. Boles, "Termodinámica", 8va ed., McGraw Hill, 2015.
- [22] D. Systèmes, "*Abaqus theory manual*", 2011.
- [23] BSSA, «British Stainless Steel Association,» 2001. [En línea]. Available: www.bssa.org.uk.
- [24] EN1991-1-1, "*Eurocode 1:Actions on structures-Part 1-1: General actions-densities, self weight, imposed loads for buildings*", Brussels: CEN, 2002.
- [25] EN1993-1-5, "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements", Brussels: CEN, 2006.

ANEJO A. Propiedades térmicas

Todas las propiedades termodinámicas que describen los procesos de transferencia de calor de un determinado material varían a medida que aumenta su temperatura. Las ecuaciones (A. 1) y (A. 2) describen cómo varía el calor específico (J/kgK) del acero al carbono y el inoxidable respectivamente.

Acero al carbono

$$c = 425 + 0.773 \cdot \theta - 1.69 \times 10^{-3} \cdot \theta^2 + 2.22 \times 10^{-6} \cdot \theta^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 600^\circ\text{C}$$

$$c = 666 + \frac{13002}{738 - \theta} \quad 600^\circ\text{C} \leq \theta < 735^\circ\text{C}$$

$$c = 545 + \frac{17820}{\theta - 731} \quad 735^\circ\text{C} \leq \theta < 900^\circ\text{C}$$

(A. 1)

$$c = 650 \quad 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Acero inoxidable

$$c = 450 + 0.28 \cdot \theta - 2.91 \times 10^{-4} \cdot \theta^2 + 1.34 \times 10^{-7} \cdot \theta^3 \quad \text{Para austenítico y dúplex}$$

(A. 2)

$$c = 430 + 0.26 \cdot \theta \quad \text{Para ferrítico}$$

Si representamos en una gráfica las ecuaciones anteriores tenemos la Figura A. 1.

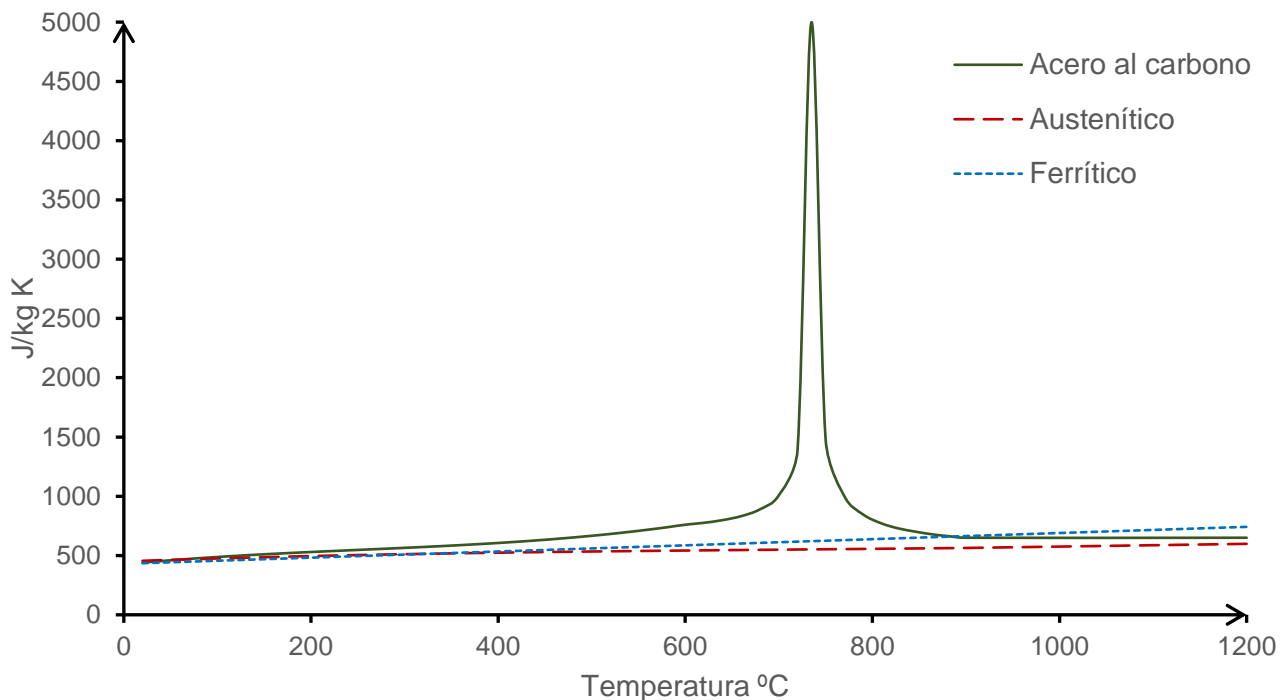


Figura A. 1 Calor específico del acero al carbono y acero inoxidable en función de la temperatura

Las ecuaciones (A. 3) y (A. 4) muestran cómo cambia la conductividad térmica (W/mK) del acero al carbono y el acero inoxidable a elevadas temperaturas.

Acero al carbono

$$\lambda = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \cdot \theta \quad 20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 800^{\circ}\text{C} \quad (\text{A. 3})$$

$$\lambda = 27.3 \quad 800^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

Acero inoxidable

$$\lambda = 14.6 + 1.27 \times 10^{-2} \cdot \theta \quad \text{Para austenítico y dúplex} \quad (\text{A. 4})$$

$$\lambda = 20.4 + 2.28 \times 10^{-2} \cdot \theta - 1.54 \times 10^{-5} \cdot \theta^2 \quad \text{Para ferrítico}$$

Una representación más visual de las ecuaciones anteriores se tiene en la Figura A. 2.

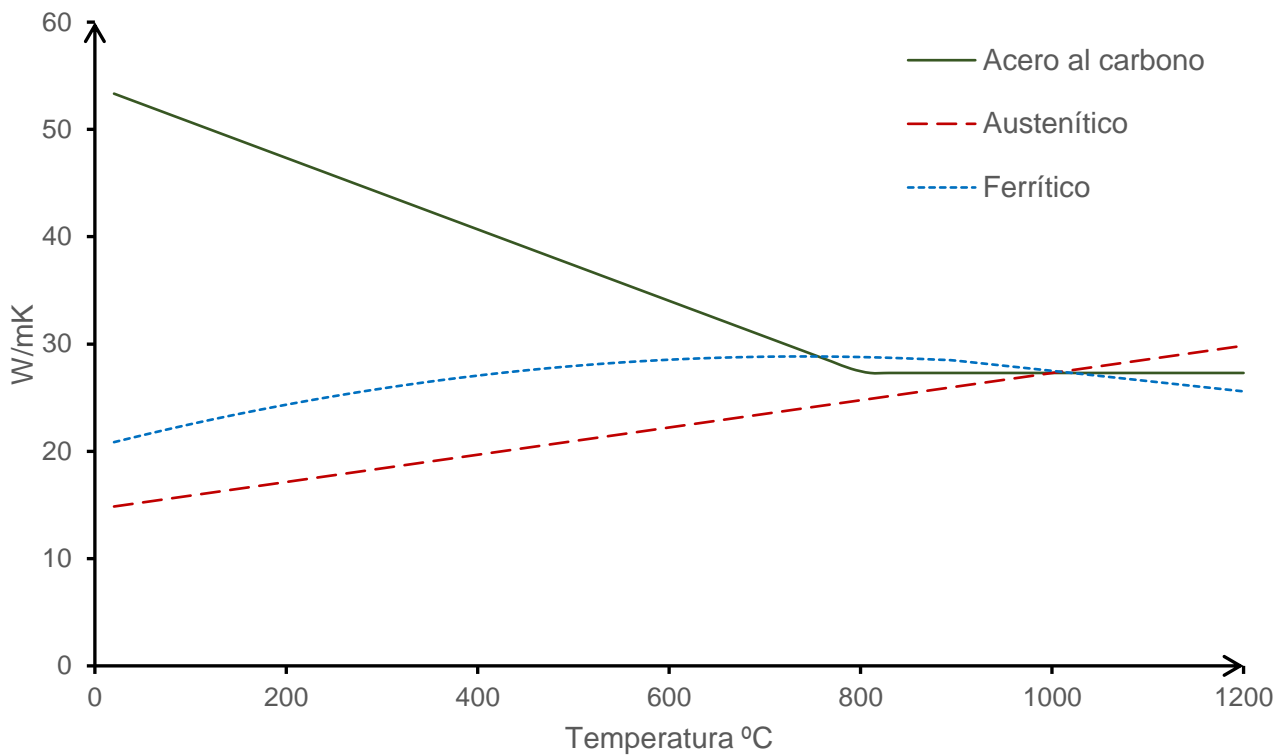


Figura A. 2 Conductividad térmica del acero al carbono y acero inoxidable en función de la temperatura

En cuanto a la elongación del acero al carbono y el acero inoxidable a elevadas temperaturas, las ecuaciones (A. 5) y (A. 6) muestran el valor de esta según la temperatura.

Acero al carbono

$$\Delta L/L = 1.2 \times 10^{-5} \cdot \theta + 0.4 \times 10^{-8} \cdot \theta^2 - 2.416 \times 10^{-4} \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 750^\circ\text{C}$$

$$\Delta L/L = 1.1 \times 10^{-2} \cdot \quad 750^\circ\text{C} \leq \theta \leq 860^\circ\text{C} \quad (\text{A. 5})$$

$$\Delta L/L = 2.0 \times 10^{-5} \cdot \theta - 6.2 \times 10^{-3} \quad 860^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Acero inoxidable

$$\frac{\Delta L}{L} = (16 + 4.79 \times 10^{-3} \cdot \theta - 1.243 \times 10^{-6} \cdot \theta^2) (\theta - 20) \times 10^{-6} \quad \text{Para austenítico, dúplex y ferrítico} \quad (\text{A. 6})$$

Graficando las ecuaciones anteriores se tiene en la Figura A. 3.

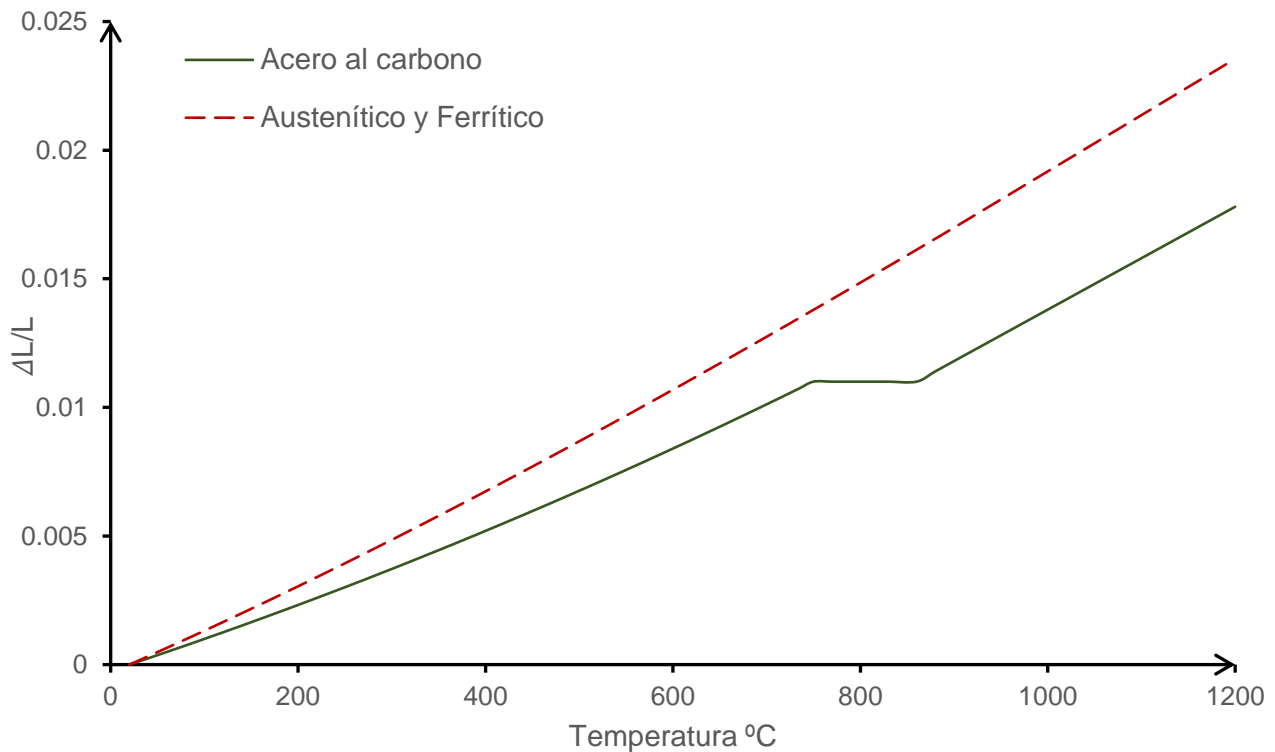


Figura A. 3 Elongación del acero al carbono y acero inoxidable en función de la temperatura

ANEJO B. Ecuación de Ramberg-Osgood

Varios trabajos se han llevado para encontrar una expresión analítica que describa el comportamiento tensión- deformación del acero inoxidable; el modelo más simple que pueda adaptarse es el exponencial aunque es impreciso en deformaciones pequeñas, expresiones polinomiales con potencias han tenido un mejor acercamiento y dentro de las cuales el modelo propuesto por Ramberg y Osgood [13] (ecuación (B. 1)) es el más popular ya que las constantes tienen un significado físico a diferencia de otros modelos.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + K \left[\frac{\sigma}{E_0} \right]^n \quad (\text{B. 1})$$

El inconveniente de esta expresión es que no se resuelve explícitamente para la tensión y es necesario resolverla por métodos numéricos; lo cual no es operable en el diseño estructural. Posteriormente fue modificada hacia la forma que resulta más familiar, con los valores de la tensión de prueba 0.2% de deformación como se muestra en la ecuación (B. 2).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left[\frac{\sigma}{\sigma_{p0.2}} \right]^n \quad (\text{B. 2})$$

Aunque la ecuación ha sido la que mejor se adapta a los datos experimentales y para operar en un modelo numérico no tiene importancia que no sea resuelta explícitamente para la tensión; a tensiones mayores que la tensión de prueba 0.2% la expresión (B. 2) sobrestima los valores de la tensión y ha tenido que dividirse en dos tramos para encajar mejor con los valores experimentales, estas expresiones se recogen en el apartado 3.2.5.

ANEJO C. Curvas de Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y el modelo numérico

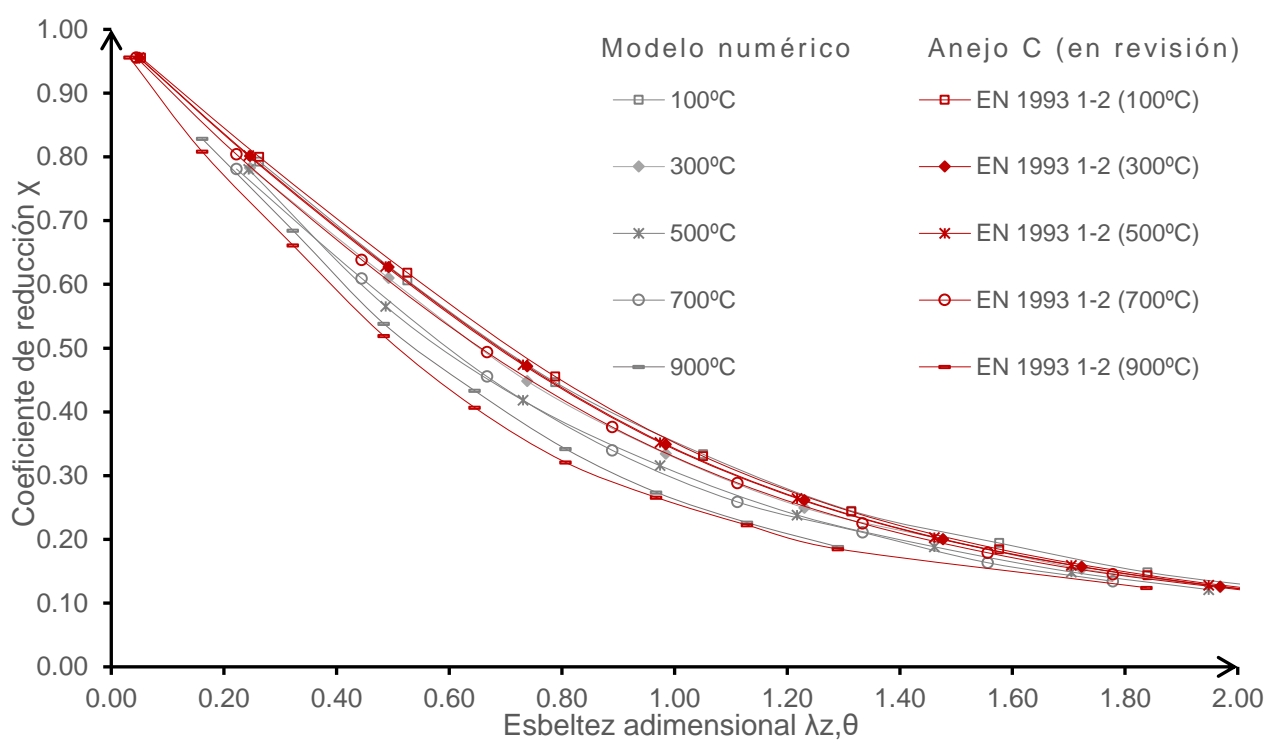
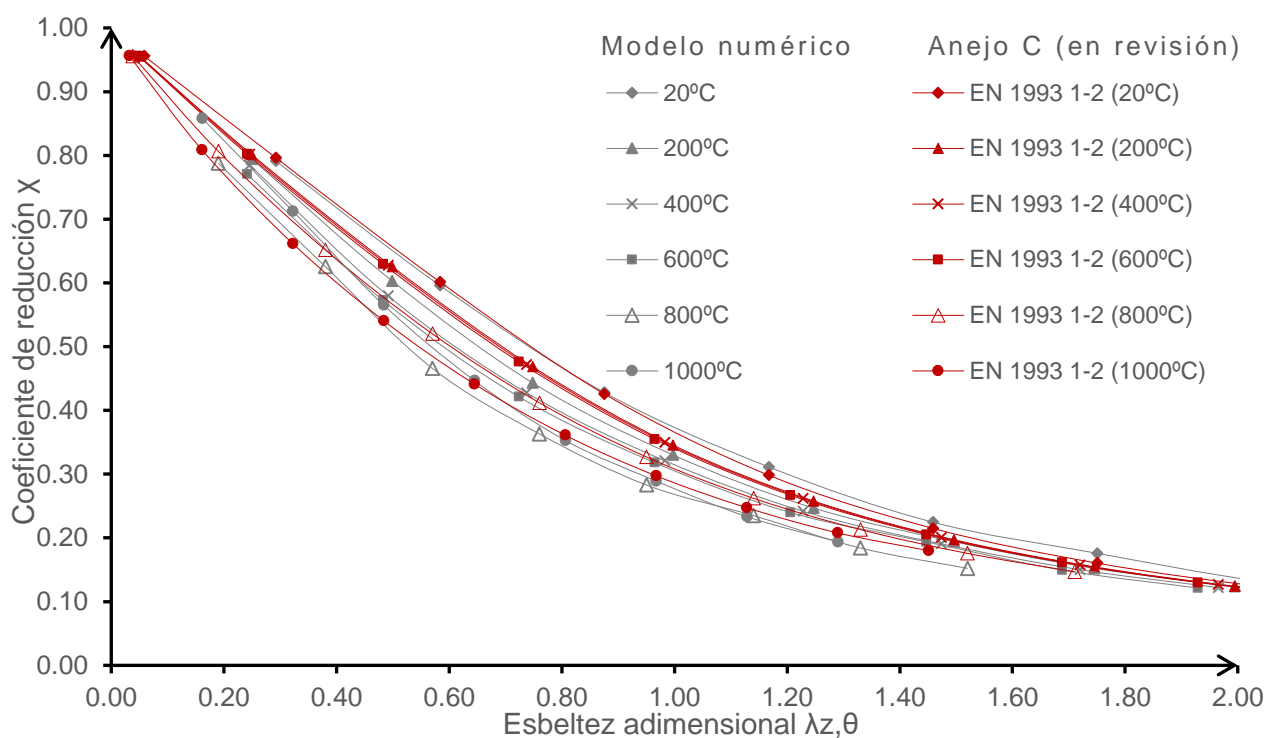


Figura C. 1 Curvas de pandeo para austenítico 1.4301 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico

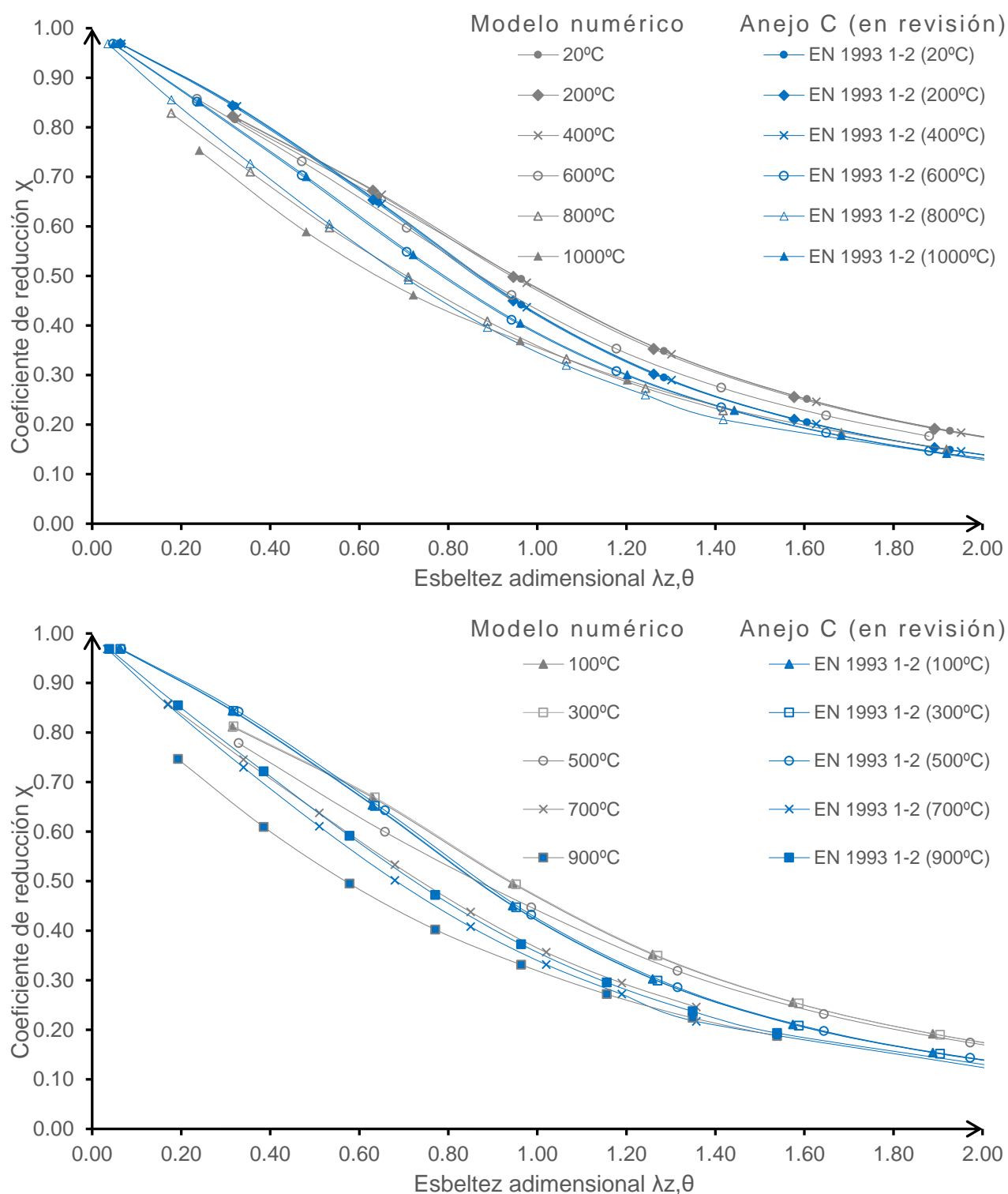


Figura C. 2 Curvas de pandeo para ferrítico 1.4003 obtenidas del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y del modelo numérico

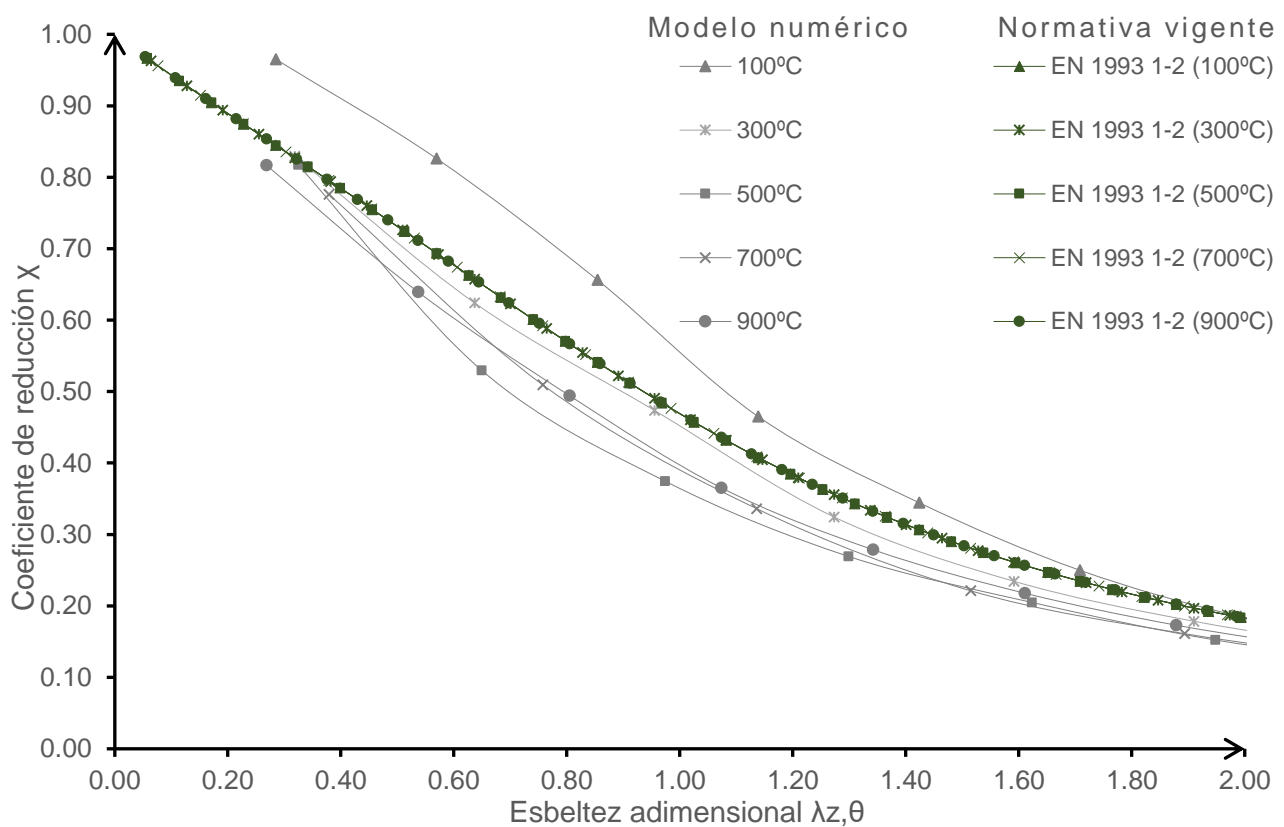
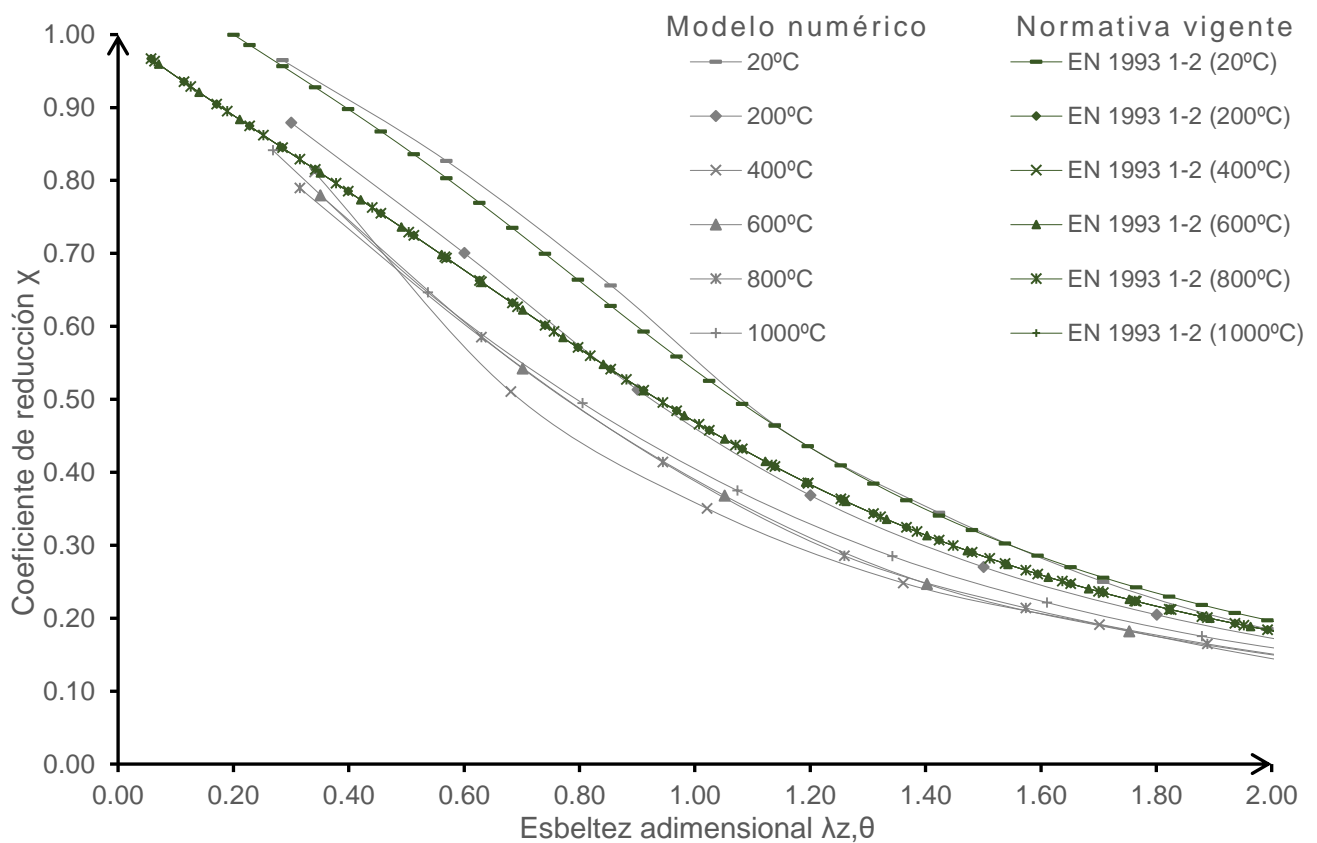


Figura C. 3 Curvas de pandeo para acero al carbono S275 obtenidas de EN 1993-1-1 para 20°C, EN 1993-1-2 para elevadas temperaturas, y del modelo numérico

ANEJO D. Curvas de pandeo de la nueva propuesta y el modelo numérico

Se presentan los valores obtenidos con el modelo numérico, los valores de la función analítica del Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y los valores obtenidos con la nueva propuesta, a diferentes temperaturas.

Tabla D. 1 Valores para X según modelo numérico, Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y según la nueva propuesta, para acero inoxidable austenítico 1.4301

Temperatura	Esbeltez adimensional	Modelo numérico	Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)		Nueva propuesta	
	$\lambda_{z,\theta}$	χ	χ	J_i	χ	J_i
20 °C	0.2918	0.7914	0.7966	0.9935	0.7598	1.0416
	0.5835	0.5960	0.6016	0.9908	0.5461	1.0915
	0.8753	0.4282	0.4259	1.0053	0.3728	1.1483
	1.1670	0.3114	0.2984	1.0434	0.2569	1.2121
	1.4588	0.2246	0.2149	1.0453	0.1838	1.2224
	1.7506	0.1758	0.1604	1.0965	0.1368	1.2856
	2.0423	0.1316	0.1236	1.0644	0.1053	1.2492
	2.3341	0.1073	0.0980	1.0950	0.0835	1.2854
100 °C	0.2628	0.7928	0.7999	0.9911	0.7640	1.0377
	0.5255	0.6063	0.6185	0.9803	0.5646	1.0738
	0.7883	0.4465	0.4554	0.9805	0.4012	1.1128
	1.0510	0.3334	0.3303	1.0093	0.2855	1.1679
	1.3138	0.2448	0.2436	1.0052	0.2087	1.1733
	1.5766	0.1942	0.1846	1.0520	0.1576	1.2327
	1.8393	0.1484	0.1439	1.0316	0.1226	1.2107
	2.1021	0.1199	0.1149	1.0435	0.0979	1.2255
200 °C	0.2493	0.7944	0.8013	0.9914	0.7658	1.0374
	0.4986	0.6031	0.6256	0.9640	0.5725	1.0535
	0.7479	0.4433	0.4686	0.9460	0.4141	1.0704
	0.9972	0.3302	0.3455	0.9556	0.2993	1.1033
	1.2466	0.2469	0.2580	0.9571	0.2213	1.1158
	1.4959	0.1941	0.1972	0.9842	0.1684	1.1526
	1.7452	0.1522	0.1546	0.9848	0.1317	1.1556
	1.9945	0.1238	0.1240	0.9981	0.1056	1.1723
300 °C	0.2461	0.7829	0.8016	0.9767	0.7662	1.0219
	0.4921	0.6100	0.6272	0.9725	0.5743	1.0622
	0.7382	0.4484	0.4717	0.9507	0.4172	1.0749
	0.9843	0.3346	0.3492	0.9582	0.3027	1.1056
	1.2304	0.2496	0.2615	0.9543	0.2244	1.1122
	1.4764	0.2002	0.2004	0.9993	0.1711	1.1701
	1.7225	0.1539	0.1573	0.9781	0.1341	1.1478
	1.9686	0.1253	0.1264	0.9919	0.1076	1.1651
400 °C	0.2456	0.7850	0.8017	0.9792	0.7662	1.0245
	0.4913	0.5798	0.6275	0.9241	0.5745	1.0092
	0.7369	0.4279	0.4721	0.9063	0.4176	1.0246
	0.9826	0.3211	0.3497	0.9182	0.3031	1.0594
	1.2282	0.2418	0.2620	0.9230	0.2248	1.0757
	1.4738	0.1906	0.2008	0.9492	0.1715	1.1115
	1.7195	0.1502	0.1577	0.9524	0.1344	1.1176
	1.9651	0.1221	0.1267	0.9636	0.1078	1.1318

500 °C	0.2435	0.7806	0.8019	0.9735	0.7665	1.0184
	0.4870	0.5658	0.6285	0.9001	0.5757	0.9827
	0.7305	0.4182	0.4741	0.8822	0.4196	0.9968
	0.9740	0.3157	0.3522	0.8965	0.3054	1.0339
	1.2175	0.2382	0.2643	0.9011	0.2269	1.0499
	1.4610	0.1884	0.2029	0.9287	0.1733	1.0873
	1.7045	0.1488	0.1595	0.9330	0.1359	1.0948
	1.9481	0.1212	0.1282	0.9452	0.1092	1.1103
600 °C	0.2411	0.7706	0.8021	0.9607	0.7668	1.0050
	0.4822	0.5729	0.6297	0.9098	0.5771	0.9928
	0.7234	0.4216	0.4764	0.8851	0.4218	0.9995
	0.9645	0.3182	0.3549	0.8968	0.3078	1.0338
	1.2056	0.2398	0.2670	0.8982	0.2292	1.0463
	1.4467	0.1939	0.2053	0.9446	0.1753	1.1058
	1.6879	0.1495	0.1616	0.9255	0.1377	1.0859
	1.9290	0.1214	0.1300	0.9339	0.1107	1.0970
700 °C	0.2223	0.7810	0.8039	0.9716	0.7690	1.0156
	0.4446	0.6095	0.6386	0.9545	0.5870	1.0384
	0.6669	0.4555	0.4935	0.9229	0.4390	1.0376
	0.8892	0.3398	0.3763	0.9030	0.3277	1.0370
	1.1116	0.2588	0.2885	0.8969	0.2483	1.0423
	1.3339	0.2110	0.2250	0.9378	0.1924	1.0964
	1.5562	0.1633	0.1789	0.9128	0.1526	1.0705
	1.7785	0.1342	0.1451	0.9245	0.1235	1.0859
800 °C	0.1900	0.7878	0.8065	0.9768	0.7723	1.0200
	0.3800	0.6256	0.6518	0.9598	0.6019	1.0394
	0.5700	0.4659	0.5203	0.8955	0.4663	0.9993
	0.7600	0.3632	0.4120	0.8815	0.3614	1.0050
	0.9500	0.2830	0.3270	0.8654	0.2829	1.0002
	1.1400	0.2350	0.2621	0.8964	0.2250	1.0445
	1.3300	0.1841	0.2130	0.8644	0.1820	1.0119
	1.5200	0.1522	0.1757	0.8665	0.1497	1.0171
900 °C	0.1612	0.8286	0.8085	1.0249	0.7748	1.0694
	0.3224	0.6848	0.6615	1.0352	0.6130	1.1171
	0.4837	0.5385	0.5192	1.0373	0.4876	1.1045
	0.6449	0.4335	0.4070	1.0651	0.3897	1.1122
	0.8061	0.3422	0.3210	1.0659	0.3143	1.0887
	0.9673	0.2874	0.2659	1.0810	0.2564	1.1210
	1.1286	0.2264	0.2225	1.0177	0.2119	1.0686
	1.2898	0.1883	0.1608	1.1709	0.1774	1.0617
1000 °C	0.1612	0.8583	0.8085	1.0616	0.7748	1.1077
	0.3224	0.7126	0.6615	1.0771	0.6130	1.1624
	0.4837	0.5652	0.5407	1.0453	0.4876	1.1592
	0.6449	0.4467	0.4413	1.0124	0.3897	1.1462
	0.8061	0.3529	0.3610	0.9775	0.3143	1.1228
	0.9673	0.2892	0.2974	0.9725	0.2564	1.1279
	1.1286	0.2333	0.2473	0.9433	0.2119	1.1009
	1.2898	0.1938	0.2078	0.9324	0.1774	1.0925

Tabla D. 2 Valores para X según modelo numérico, Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión) y según la nueva propuesta, para acero inoxidable ferrítico 1.4003

Temperatura	Esbeltez adimensional	Modelo numérico	Anejo C EN 1993-1-2 (en revisión)		Nueva propuesta	
	$\lambda_{z,\theta}$	χ	χ	J_i	χ	J_i
20 °C	0.3211	0.8157	0.8431	0.9676	0.7778	1.0488
	0.6422	0.6589	0.6489	1.0153	0.5616	1.1732
	0.9633	0.4938	0.4420	1.1172	0.3781	1.3063
	1.2844	0.3483	0.2948	1.1816	0.2562	1.3591
	1.6055	0.2515	0.2047	1.2284	0.1811	1.3890
	1.9266	0.1874	0.1491	1.2571	0.1336	1.4027
	2.2477	0.1448	0.1129	1.2823	0.1022	1.4164
	2.5635	0.1148	0.0884	1.2990	0.0809	1.4184
100 °C	0.3147	0.8114	0.8438	0.9616	0.7787	1.0420
	0.6293	0.6540	0.6538	1.0002	0.5660	1.1555
	0.9440	0.4955	0.4504	1.1003	0.3845	1.2888
	1.2587	0.3521	0.3026	1.1637	0.2623	1.3423
	1.5734	0.2558	0.2110	1.2125	0.1861	1.3749
	1.8880	0.1918	0.1540	1.2459	0.1376	1.3938
	2.2027	0.1484	0.1168	1.2700	0.1055	1.4061
	2.5123	0.1179	0.0915	1.2890	0.0836	1.4106
200 °C	0.3153	0.8224	0.8437	0.9748	0.7786	1.0563
	0.6306	0.6720	0.6534	1.0285	0.5656	1.1882
	0.9459	0.4978	0.4496	1.1073	0.3839	1.2968
	1.2612	0.3525	0.3018	1.1681	0.2617	1.3470
	1.5765	0.2558	0.2104	1.2157	0.1856	1.3782
	1.8918	0.1915	0.1535	1.2478	0.1372	1.3956
	2.2071	0.1480	0.1164	1.2709	0.1052	1.4068
	2.5172	0.1176	0.0912	1.2900	0.0833	1.4114
300 °C	0.3174	0.8124	0.8435	0.9631	0.7783	1.0437
	0.6349	0.6539	0.6517	1.0033	0.5641	1.1592
	0.9523	0.4936	0.4468	1.1048	0.3817	1.2930
	1.2698	0.3497	0.2992	1.1688	0.2597	1.3466
	1.5872	0.2531	0.2083	1.2152	0.1839	1.3763
	1.9046	0.1896	0.1518	1.2490	0.1359	1.3956
	2.2221	0.1466	0.1151	1.2736	0.1041	1.4086
	2.5343	0.1165	0.0901	1.2928	0.0824	1.4134
400 °C	0.3252	0.8190	0.8425	0.9721	0.7772	1.0539
	0.6505	0.6638	0.6457	1.0280	0.5587	1.1881
	0.9757	0.4863	0.4366	1.1138	0.3739	1.3007
	1.3010	0.3416	0.2898	1.1788	0.2524	1.3536
	1.6262	0.2461	0.2008	1.2255	0.1779	1.3832
	1.9515	0.1836	0.1460	1.2573	0.1311	1.4006
	2.2767	0.1415	0.1105	1.2803	0.1002	1.4121
	2.5966	0.1121	0.0864	1.2976	0.0792	1.4151
500 °C	0.3287	0.7786	0.8421	0.9246	0.7766	1.0025
	0.6574	0.5994	0.6430	0.9322	0.5563	1.0775
	0.9861	0.4472	0.4322	1.0348	0.3705	1.2073
	1.3147	0.3189	0.2858	1.1158	0.2492	1.2794
	1.6434	0.2319	0.1976	1.1733	0.1753	1.3225

	1.9721	0.1740	0.1435	1.2121	0.1290	1.3485
	2.3008	0.1347	0.1086	1.2410	0.0985	1.3672
	2.6241	0.1070	0.0848	1.2613	0.0779	1.3740
600 °C	0.2355	0.8574	0.8516	1.0068	0.7884	1.0875
	0.4710	0.7313	0.7029	1.0403	0.6121	1.1947
	0.7064	0.5970	0.5483	1.0889	0.4614	1.2939
	0.9419	0.4613	0.4114	1.1213	0.3446	1.3387
	1.1774	0.3529	0.3078	1.1464	0.2604	1.3550
	1.4129	0.2745	0.2346	1.1702	0.2011	1.3651
	1.6484	0.2183	0.1831	1.1923	0.1589	1.3736
	1.8800	0.1763	0.1462	1.2059	0.1287	1.3700
700 °C	0.1699	0.8580	0.8561	1.0023	0.7940	1.0806
	0.3399	0.7454	0.7296	1.0217	0.6390	1.1666
	0.5098	0.6379	0.6107	1.0446	0.5137	1.2417
	0.6798	0.5332	0.5018	1.0626	0.4130	1.2909
	0.8497	0.4380	0.4081	1.0734	0.3337	1.3126
	1.0197	0.3566	0.3319	1.0744	0.2722	1.3100
	1.1896	0.2946	0.2718	1.0837	0.2246	1.3115
	1.3568	0.2459	0.2170	1.1333	0.1882	1.3068
800 °C	0.1775	0.8285	0.8556	0.9683	0.7935	1.0442
	0.3550	0.7100	0.7271	0.9765	0.6364	1.1157
	0.5325	0.5972	0.6047	0.9877	0.5085	1.1745
	0.7100	0.4979	0.4922	1.0114	0.4056	1.2273
	0.8875	0.4088	0.3964	1.0313	0.3252	1.2570
	1.0650	0.3329	0.3196	1.0416	0.2634	1.2636
	1.2425	0.2737	0.2599	1.0528	0.2161	1.2663
	1.4171	0.2282	0.1987	1.1482	0.1802	1.2663
900 °C	0.1927	0.7464	0.8547	0.8732	0.7923	0.9420
	0.3854	0.5818	0.7216	0.8063	0.6308	0.9225
	0.5781	0.4799	0.5916	0.8112	0.4973	0.9650
	0.7708	0.4022	0.4721	0.8519	0.3903	1.0306
	0.9635	0.3314	0.3727	0.8891	0.3080	1.0759
	1.1562	0.2718	0.2955	0.9196	0.2461	1.1042
	1.3489	0.2240	0.2373	0.9443	0.1997	1.1221
	1.5384	0.1872	0.1934	0.9678	0.1650	1.1344
1000 °C	0.2403	0.7532	0.8512	0.8848	0.7879	0.9559
	0.4807	0.5888	0.7005	0.8405	0.6097	0.9657
	0.7210	0.4610	0.5428	0.8492	0.4570	1.0087
	0.9613	0.3690	0.4043	0.9128	0.3393	1.0877
	1.2017	0.2899	0.3009	0.9635	0.2552	1.1358
	1.4420	0.2294	0.2284	1.0045	0.1964	1.1681
	1.6823	0.1849	0.1778	1.0398	0.1548	1.1943
	1.9188	0.1509	0.1418	1.0641	0.1252	1.2053

Graficando los valores de la Tabla D. 1 y la Tabla D. 2, se obtiene la Figura D. 1 y la Figura D. 2, para acero inoxidable austenítico y ferrítico respectivamente.

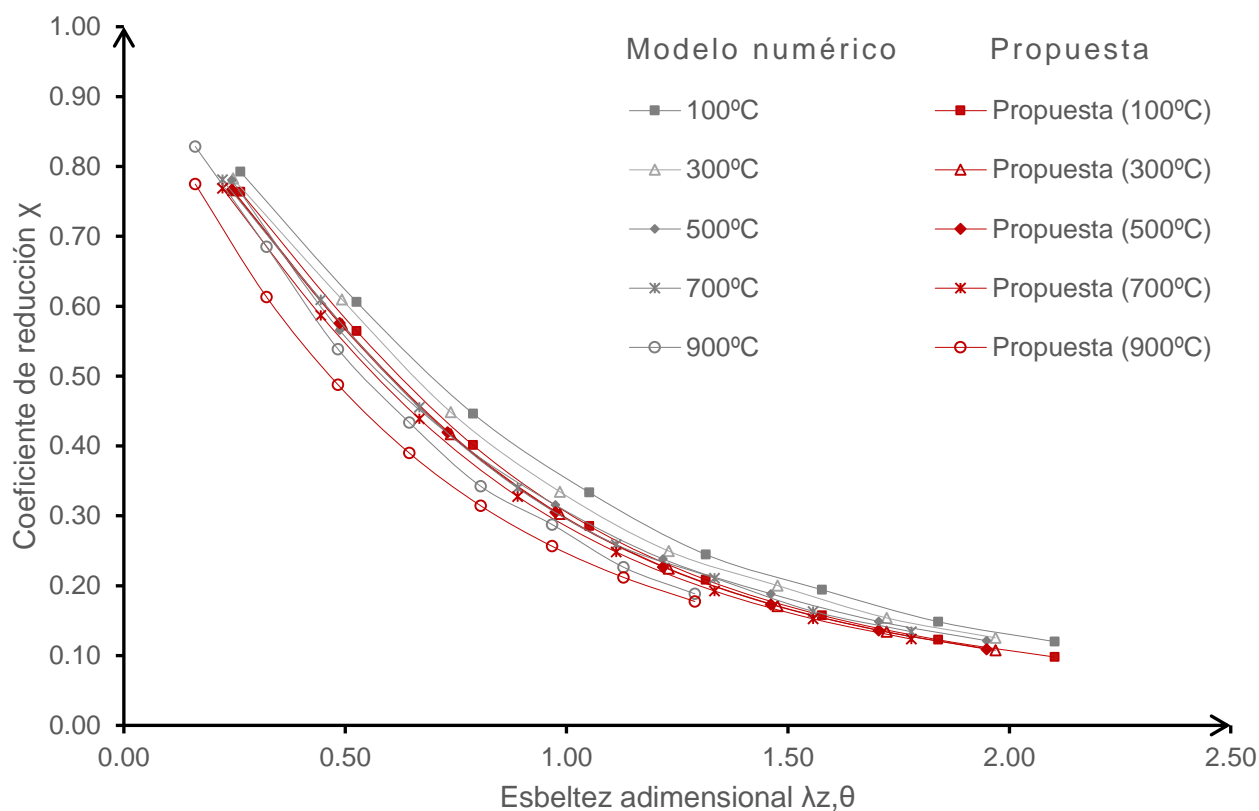
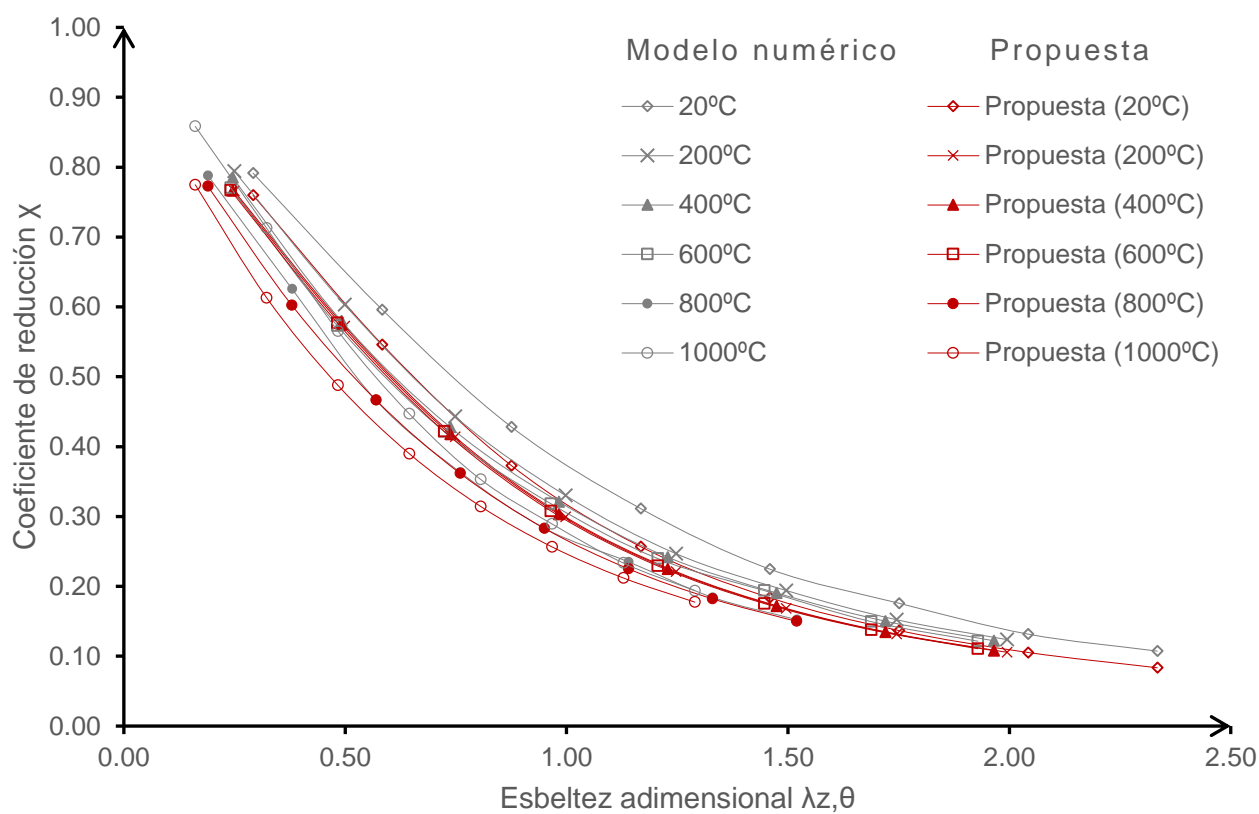


Figura D. 1 Curvas de pandeo para austenítico 1.4301 obtenidas de la propuesta realizada y del modelo numérico en Abaqus

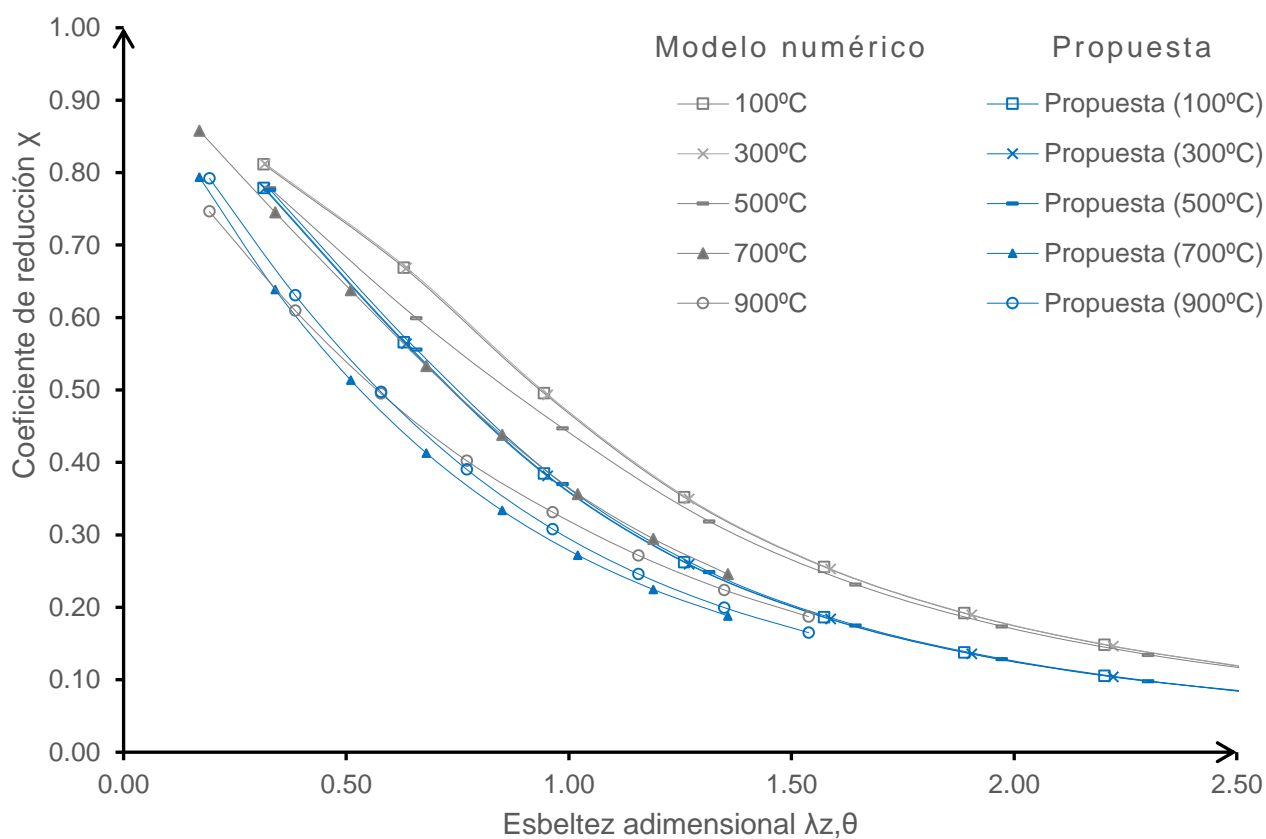
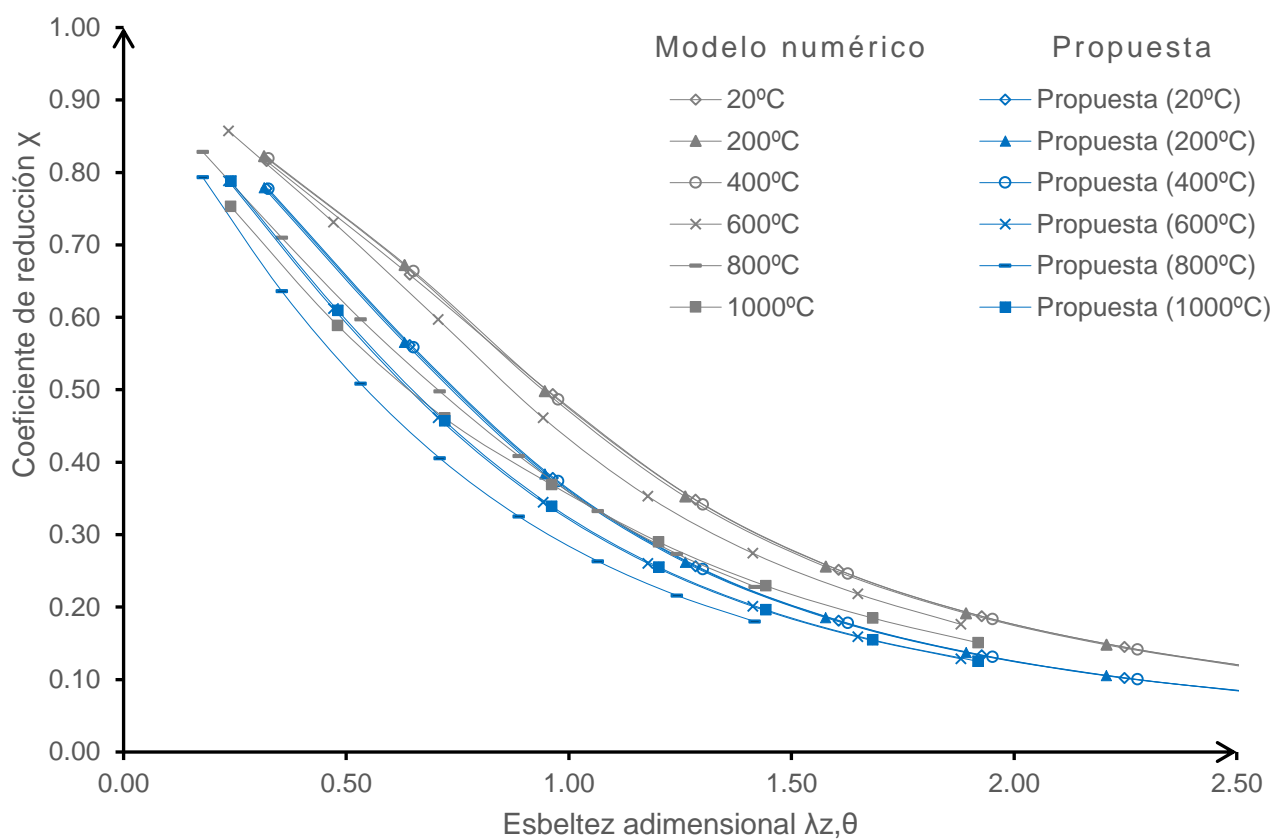


Figura D. 2 Curvas de pandeo para ferrítico 1.4003 obtenidas de la propuesta realizada y del modelo numérico en Abaqus

ANEJO E. Análisis en dominio del tiempo y el efecto de sombra

Simular el efecto de sombra en elementos finitos se llevó a cabo modificando la emisividad y la constante h_c en las interacciones de radiación y convección respectivamente, multiplicándolas por el factor del efecto sombra k_{sh} tal y como lo especifica EN 1993-1-2; si bien no considerar este factor lleva a resultados conservadores, el emplearlo en la radiación y convección lleva a resultados optimistas y hasta inseguros, puesto que el efecto sombra es un fenómeno que afecta solo a la transferencia de calor por radiación y no por convección. Se hicieron ambos análisis que se resumen en la Figura E. 1.

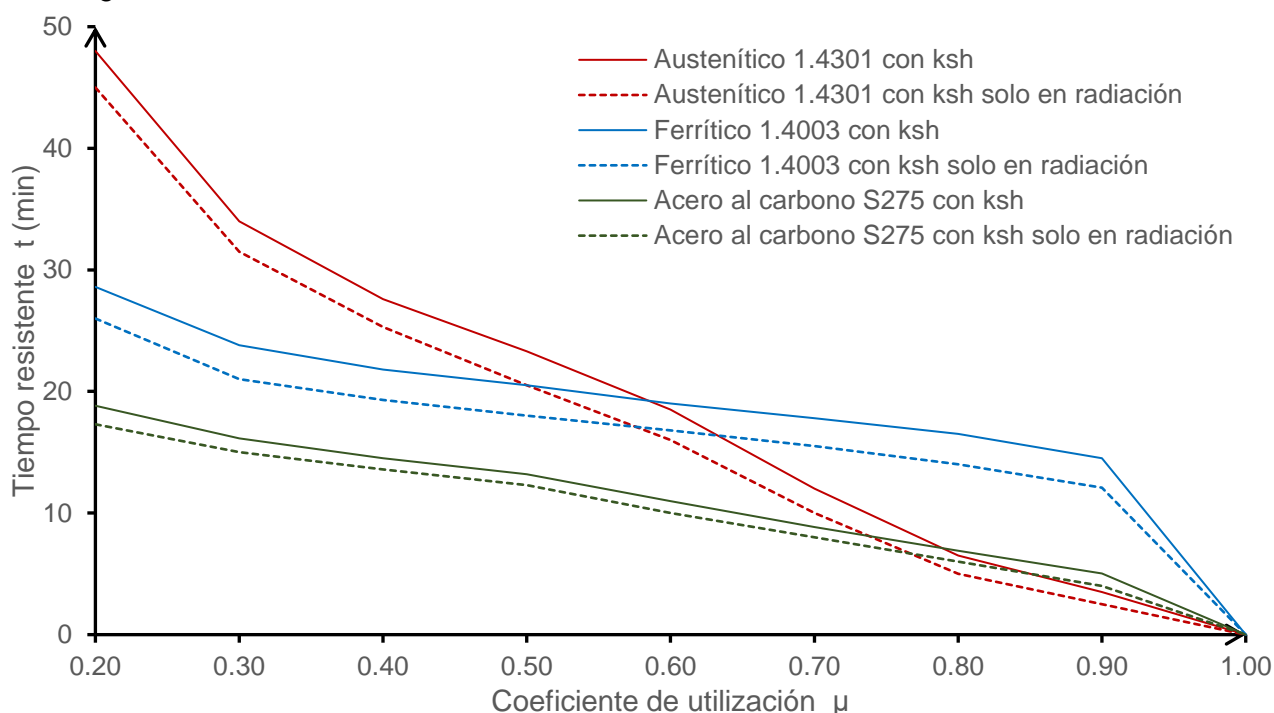


Figura E. 1 Tiempo resistente de pilar en situación de incendio a diferentes grados de utilización.

La grafica temperatura crítica respecto al coeficiente de utilización se ve muy poco afectada por el factor de efecto sombra, y las gráficas tiempo resistente respecto a la temperatura crítica se muestran por separado para compararlas con la formulación analítica. Se muestran las gráficas usando el factor k_{sh} solo en la transmisión de calor por radiación, y usándolo en la transmisión de calor por convección y radiación.

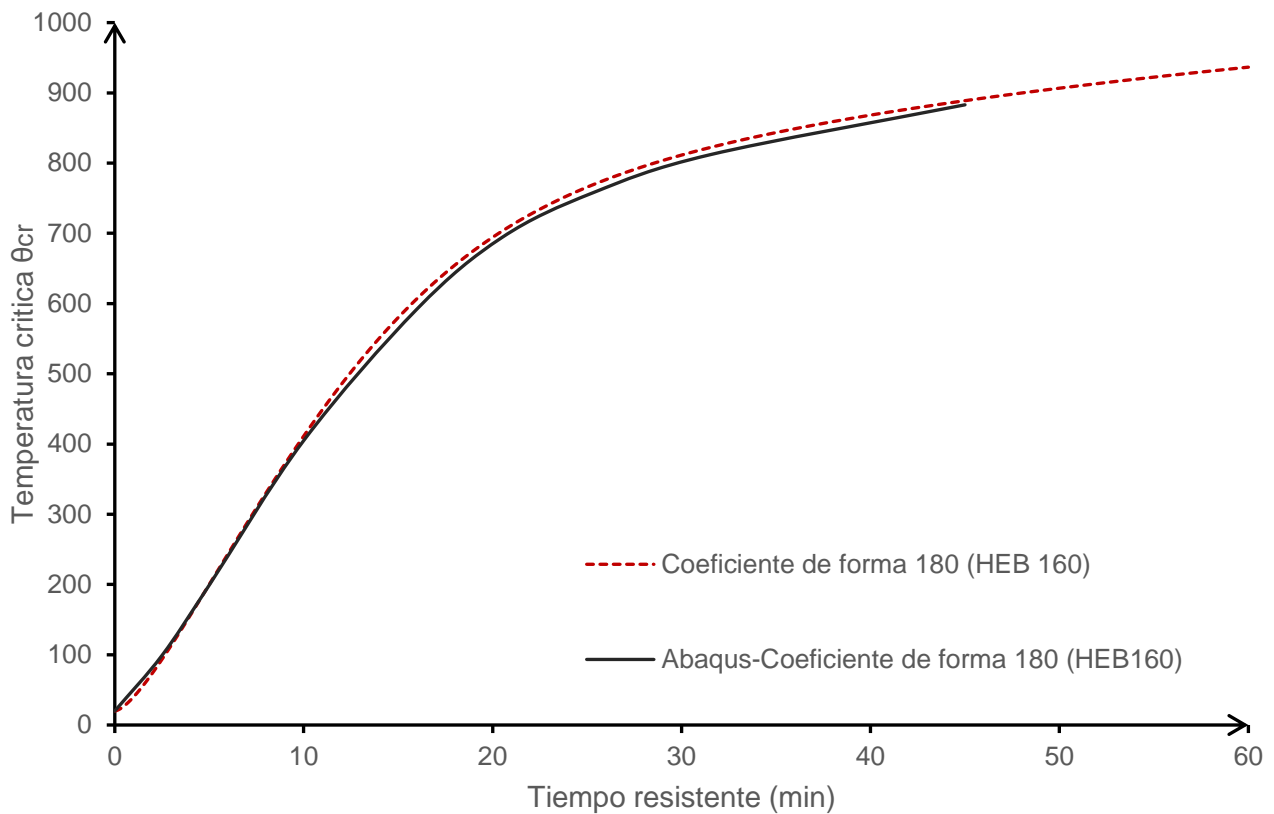


Figura E. 2 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Austenítico 1.4301 según EN 1993-1-2 y según el modelo numérico (con factor k_{sh} solo en radiación)

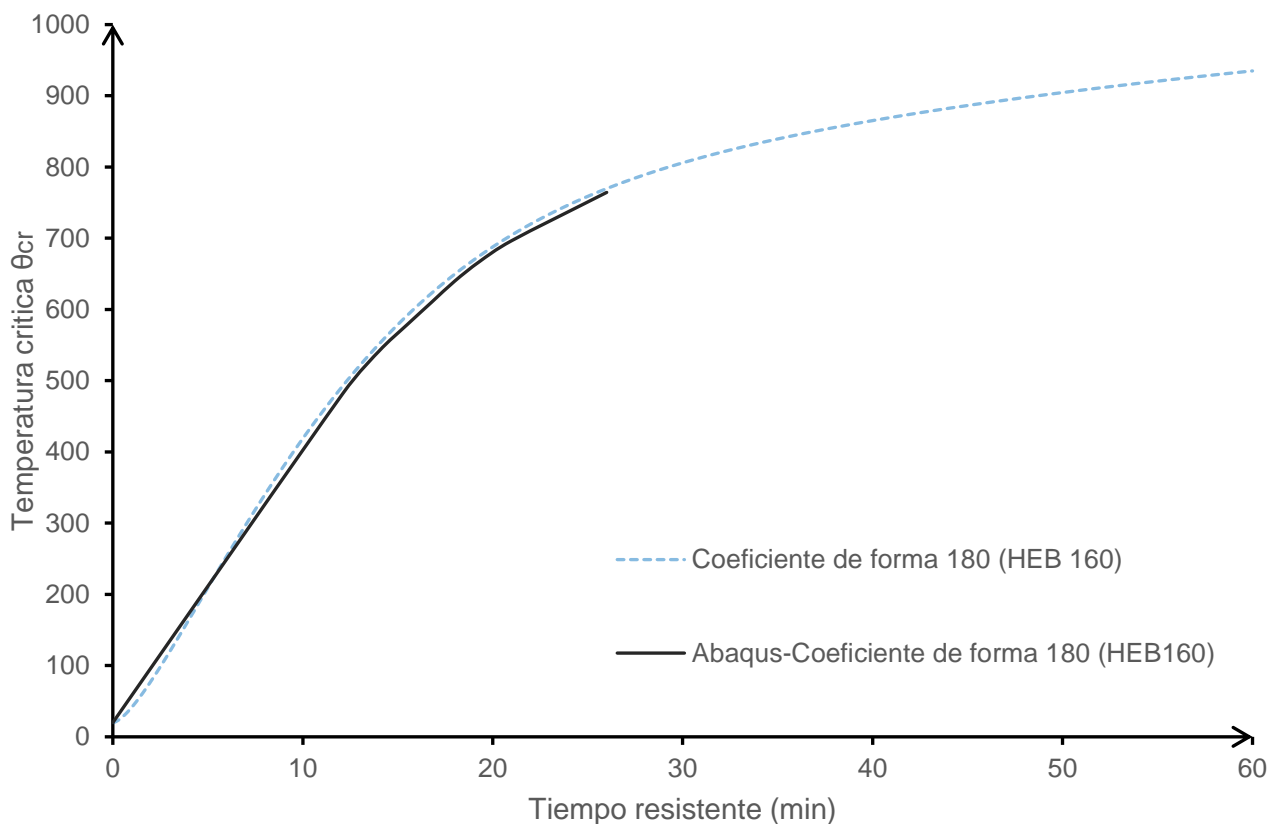


Figura E. 3 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Ferrítico 1.4003 según EN 1993-1-2 y según el modelo numérico (con factor k_{sh} solo en radiación)

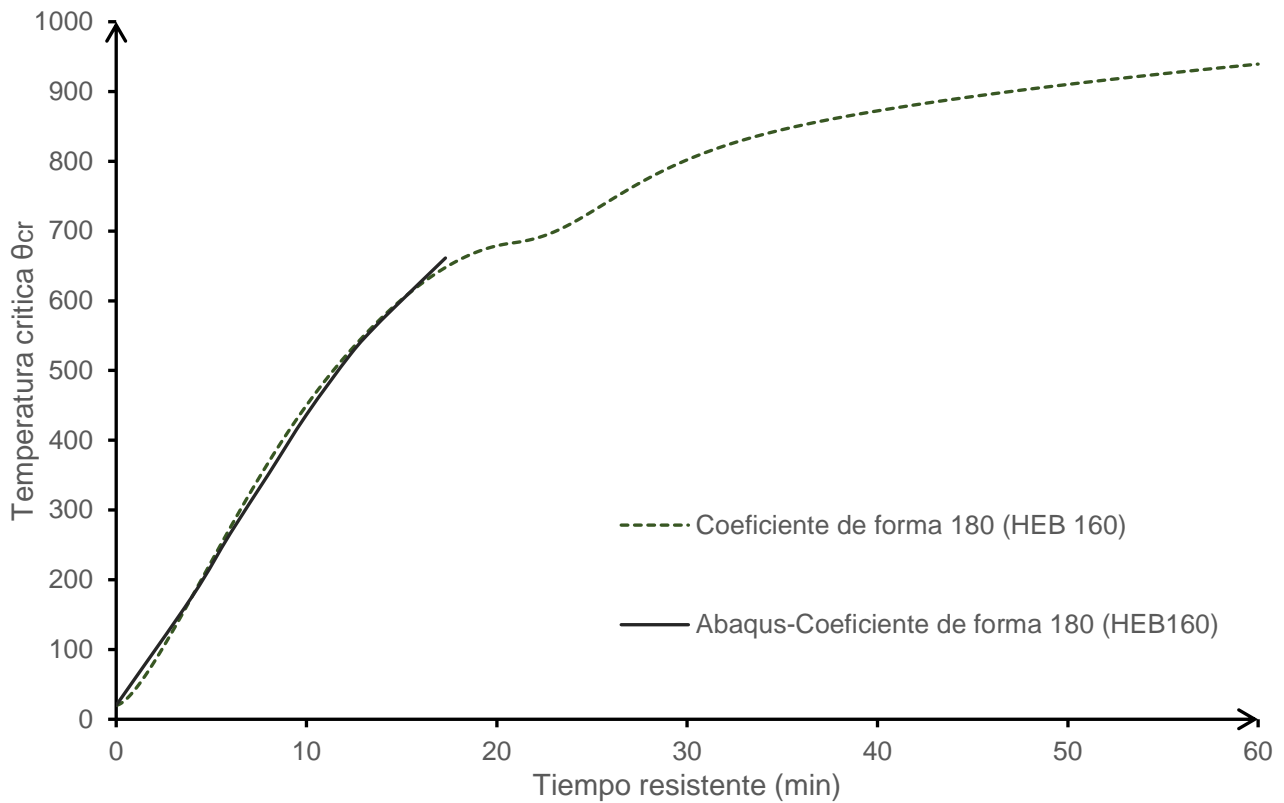


Figura E. 4 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Acero al carbono S275 según EN 1993-1-2 y según el modelo numérico (con factor k_{sh} solo en radiación)

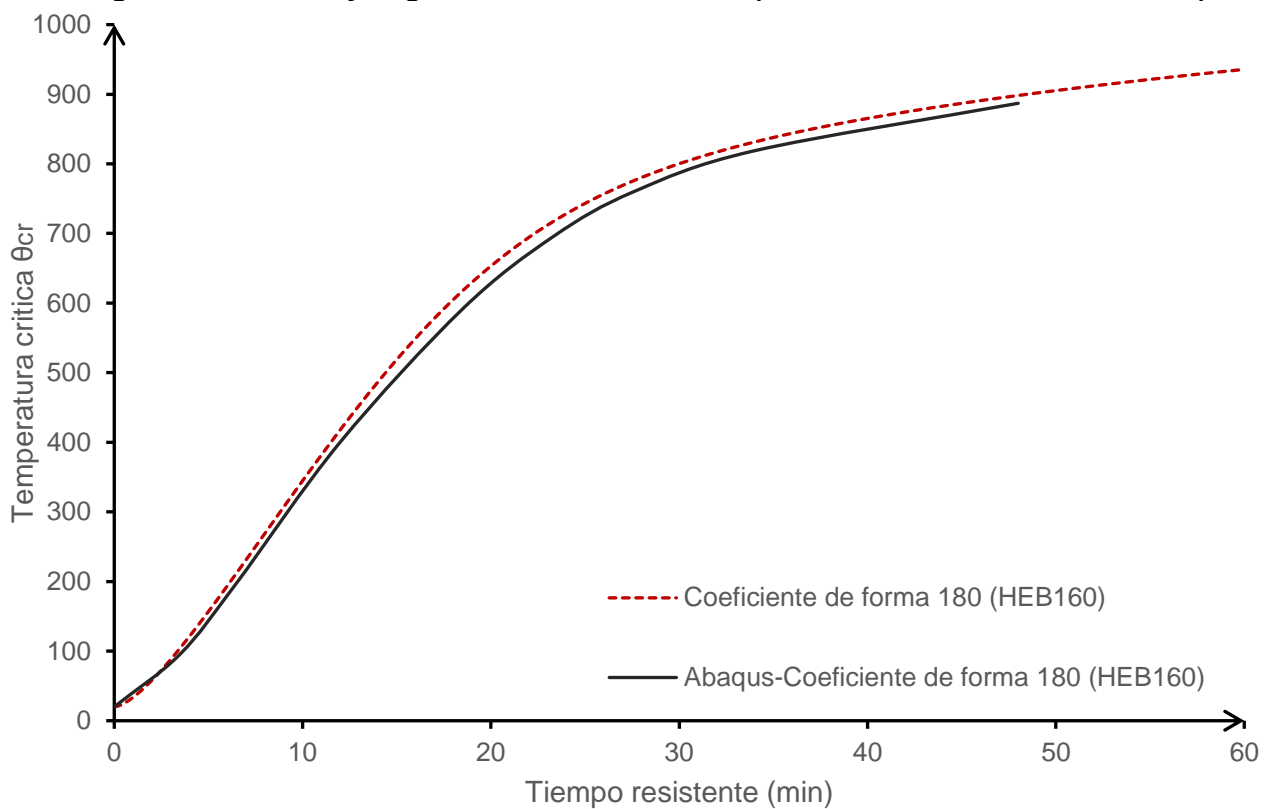


Figura E. 5 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Austenítico 1.4301 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico (con factor k_{sh} en radiación y convección)

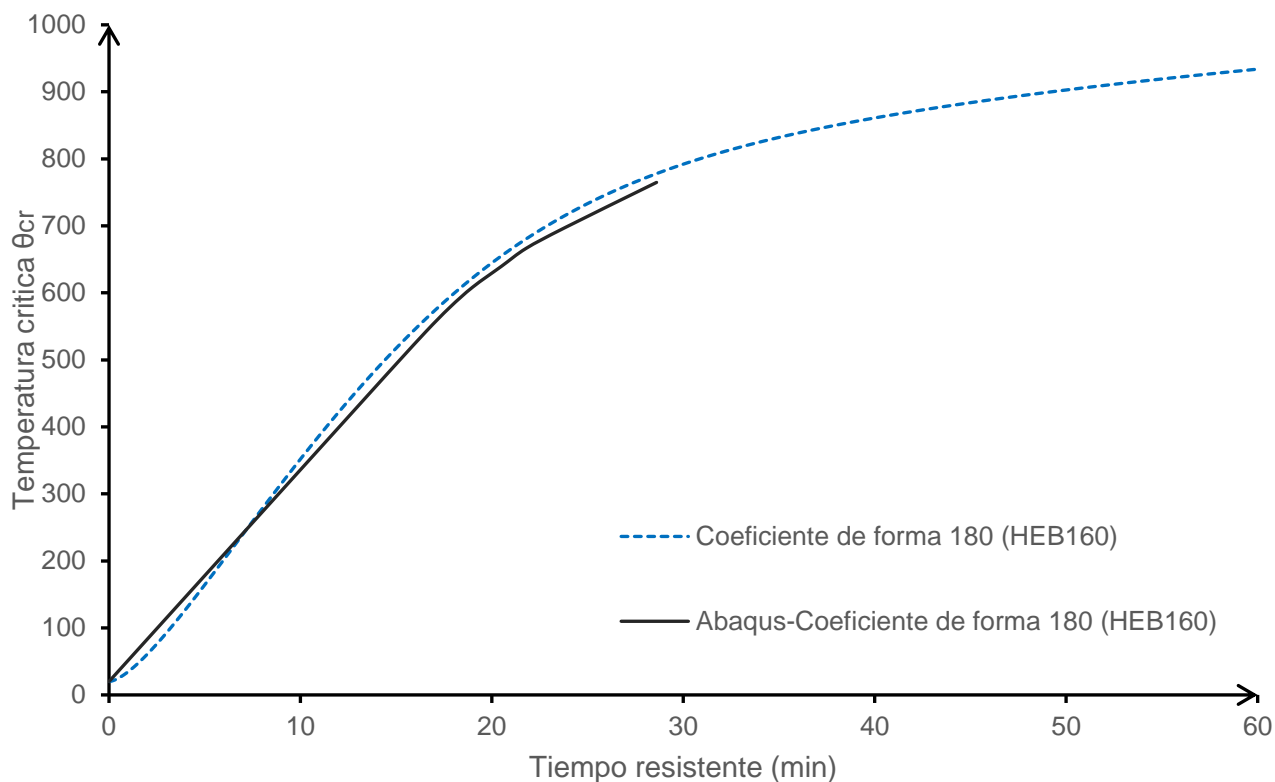


Figura E. 6 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Ferrítico 1.4003 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico (con factor k_{sh} en radiación y convección)

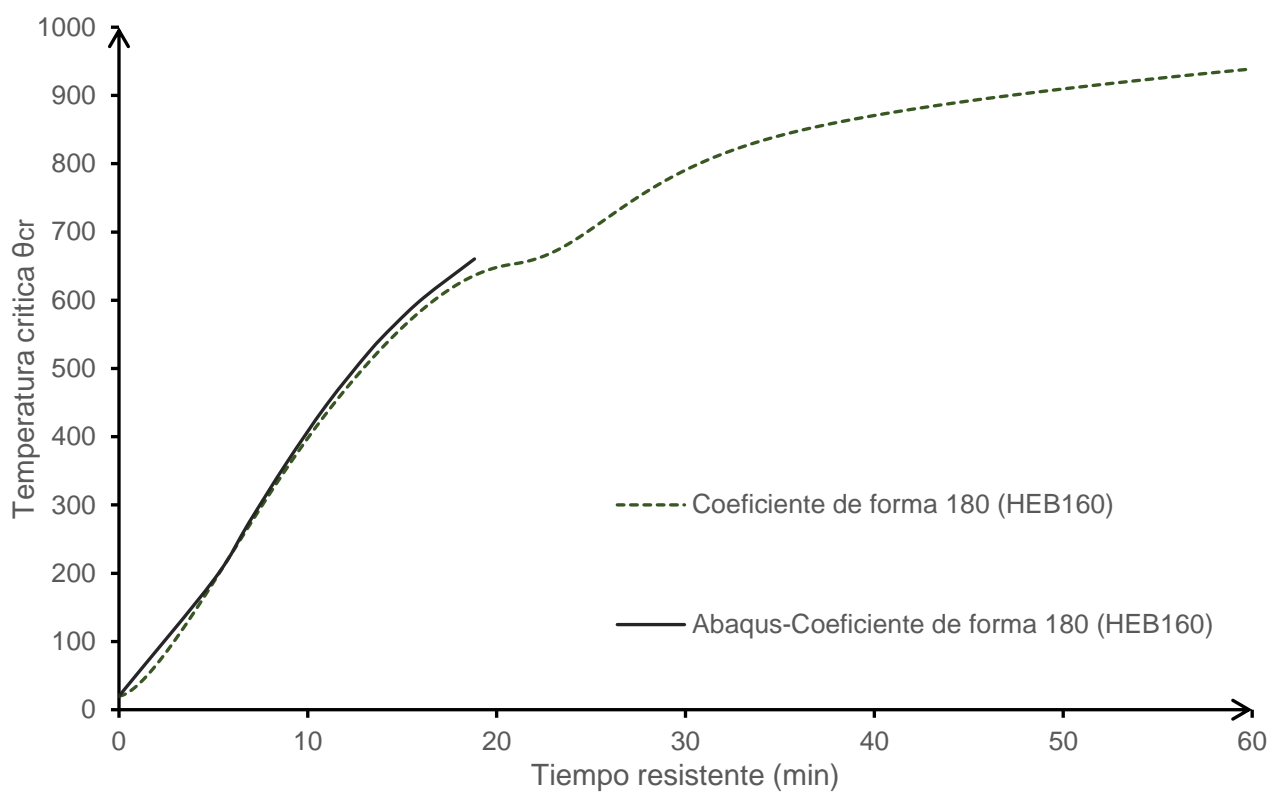


Figura E. 7 Tiempo resistente en función de la temperatura crítica para Acero al carbono S275 según EN 1993-1-2 y según modelo numérico (con factor k_{sh} en radiación y convección)

Para encontrar mediante el coeficiente de utilización la temperatura crítica del pilar analizado en el dominio del tiempo, para acero ferrítico y acero al carbono, se puede hacer uso de la Figura E. 8 y Figura E. 9.

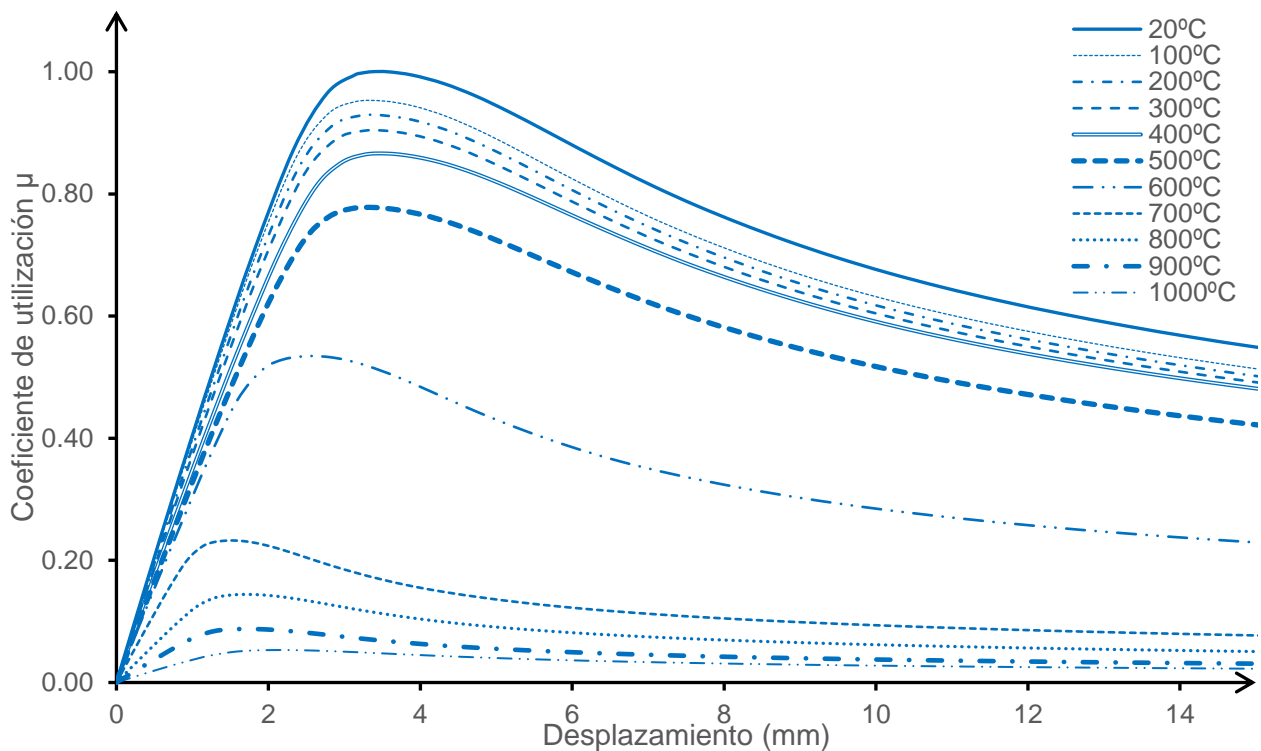


Figura E. 8 Diagrama Carga(normalizada)-desplazamiento para ferrítico 1.4003 a diferentes temperaturas, extraídas de análisis NLGM del modelo numérico

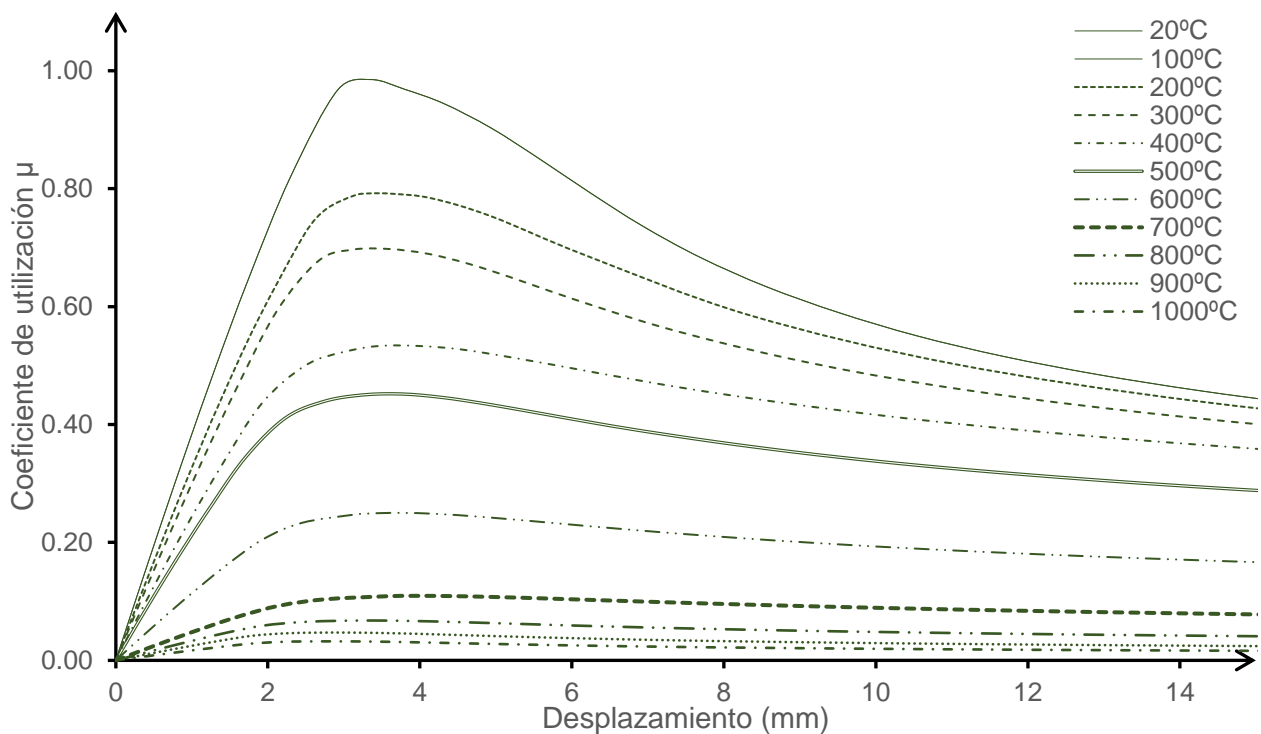


Figura E. 9 Diagrama Carga(normalizada)-desplazamiento para acero al carbono S275 a diferentes temperaturas, extraídas de análisis NLGM del modelo numérico